

# Modélisation et optimisation de la consommation d'énergie d'une station de dessalement par procédé d'osmose inverse en Algérie

A. Adda <sup>1</sup>, W.M. Naceur <sup>2</sup> et M. Abbas <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Département de Génie des Procédés et de l'Environnement,  
Université Docteur Yahia Farès, Bd de l'ALN Ain D'heb, 26000, Médéa, Algérie

<sup>2</sup> Département de Génie des Procédés,  
Université Saâd Dahlab, Blida 1  
Route de Soumâa, B.P. 270, 09000 Blida, Algérie

<sup>3</sup> Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER  
42004, Tipaza, Algérie

(reçu le 20 Mai 2016 – accepté le 29 Juin 2016)

**Résumé** - Actuellement, le coût énergétique du procédé de dessalement d'osmose inverse représente jusqu'à 50 % du coût du mètre cube d'eau produite. La réduction de la consommation spécifique d'énergie est un enjeu majeur afin de satisfaire la demande croissante avec meilleure qualité et à moindre coût. L'objectif de cette étude est de minimiser les consommations énergétiques spécifiques des stations de dessalement basées sur le procédé d'osmose inverse. Un modèle mathématique a été développé et un programme sous l'environnement Matlab a été élaboré en utilisant la méthode du gradient projeté dont le principe de base est le calcul des dérivés sous contraintes. Plusieurs configurations ont été étudiées à savoir, un système sans récupération d'énergie, et avec récupération d'énergie en utilisant un échangeur de pression PX. Les résultats obtenus montrent que le système de récupération par un échangeur de pression est de loin le meilleur dispositif permettant d'atteindre une consommation spécifique d'énergie minimale variant de 2.17 à 2.27 kWh/m<sup>3</sup>.

**Abstract** - Nowadays, the energy cost of reverse osmosis process desalination represents up to 50 % of the cubic meter of fresh water produced. The reduction of specific energy consumption (SEC) is a major challenge to satisfy the growing demand of fresh water with better quality and lower cost. The study aims to minimize the specific energy consumption (SEC) of desalination plant working on reverse osmosis (RO) process, a mathematical model is developed and a program is elaborate on the Matlab environment using the projected gradient method. Two RO plant designs are taken into account: system without recovery energy device and system with recovery energy device using the pressure exchanger (PX). The results obtained show that the pressure exchanger is one of the best recovery device enable to achieve a minimum (SEC) varying from 2.17 to 2.27 kWh/m<sup>3</sup>.

**Keywords:** Reverse osmosis process – Modeling – Optimization - Specific consumption energy - Gradient method.

## 1. INTRODUCTION

Face aux demandes croissantes de l'eau dans le monde et plus particulièrement en Algérie, produire une eau potable de qualité acceptable avec un coût minimal est le principal objectif de tous les exploitants [1]. Le recours aux techniques membranaires est plus en plus important pour résoudre le problème d'approvisionnement en eau

destinée à la consommation humaine. Les procédés de dessalement de l'eau peuvent être classés en deux grandes familles: les procédés thermiques, par évaporation ou par distillation et les procédés membranaires par l'osmose inverse [2]. L'osmose inverse devient le procédé le plus courant, le plus rentable et le moins énergivore par rapport au procédé de distillation néanmoins le coût énergétique est environ 50% du coût global d'exploitation [1]. A cet effet, l'installation de systèmes de récupération ou utiliser des pompes de faible consommation d'énergie est devenue une solution optimale pour la réduction de la consommation d'énergie. Parmi les procédés membranaires, seule l'osmose inverse est adaptée au dessalement de l'eau de mer.

Le procédé d'osmose inverse est le cœur du procédé de dessalement, avant de permettre à l'eau d'entrer la membrane elle passe par un poste de traitement appelé le prétraitement, l'eau refoulée vers les membranes d'osmose inverse sous pression à travers des pompes à haute pression, ce qui nécessite une importante consommation d'énergie de tous les équipements de la station [3]. La solution à traiter (débit  $Q_A$ ) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes:

- une partie qui passe à travers la membrane, c'est le permeat ou le filtrat ( $Q_P$ ).

- une partie qui ne passe pas à travers la membrane appelée retentat ou concentrat ( $Q_R$ ) qui est chargée des ions et particules retenues par la membrane [4]. La figure 1 schématise les composants d'une unité de dessalement d'osmose inverse.

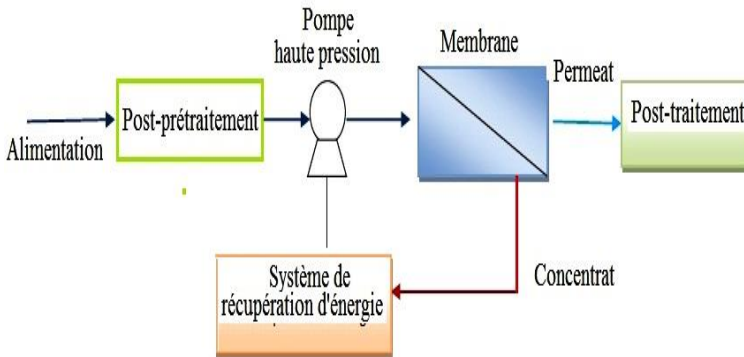


Fig. 1: Schéma de principe d'une unité de dessalement basé sur le principe d'osmose inverse [5]

La perte de charge à travers les membranes d'osmose inverse est d'environ 1.5 à 2 bars, en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, le concentrat sort donc à haute pression. Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du concentrat. Le concentrat est dirigé vers le système de récupération d'énergie, où il transmet directement son énergie à une partie de l'eau d'alimentation. Par conséquent, l'énergie de consommation dans les stations de dessalement par osmose inverse sans système de récupération varie de 5.5 à 8 kWh/m<sup>3</sup>, par contre les procédés avec installation de système de récupération, l'énergie (turbine ou échangeur de pression) variée entre 5 - 3 kWh/m<sup>3</sup> [6].

Le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie sous forme électrique pour alimenter les pompes hautes pressions qui refoulent l'eau de mer et la faire passer à travers la membrane filtrante [2], qui représente plus que la moitié du coût d'exploitation global [7]. La figure 2 représente la répartition des coûts d'exploitation moyens d'une usine de dessalement par la société Veolia.

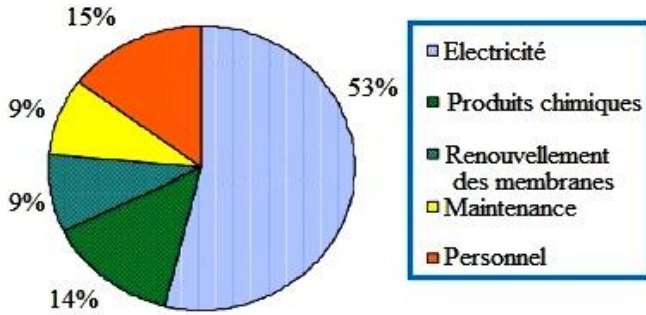


Fig. 2: Répartition des coûts d'exploitation moyens sur une usine de dessalement d'osmose inverse [8]

Pour son fonctionnement, le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie électrique pour faire fonctionner les pompes à haute pression, de circulation et autre. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) a été utilisée comme source d'énergie dans plusieurs stations de dessalement dans le monde. La figure 3 illustre le couplage de cette dernière et l'osmose inverse.

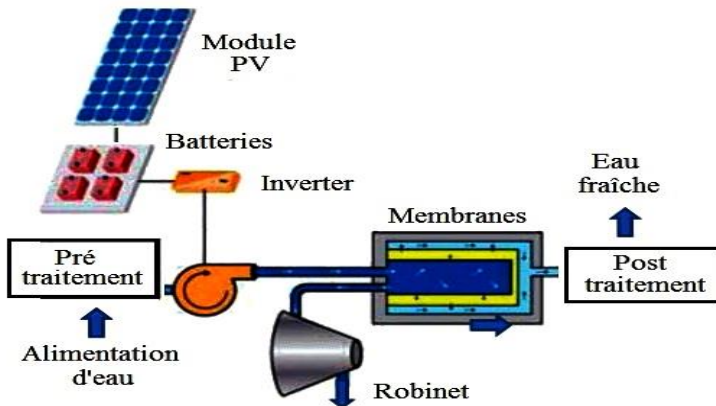


Fig. 3: Station de dessalement O.I. fonctionnant avec le photovoltaïque

## 2. METHODOLOGIE

Dans ce contexte, on a utilisé le logiciel Matlab afin d'élaborer un programme a fait d'optimiser les paramètres opérationnels et minimiser la consommation énergétique pour faire fonctionner l'usine de dessalement. L'exécution de notre programme consiste à recalculer les valeurs des paramètres opérationnels pour les différentes configurations et assurer la minimisation d'énergie

### 2.1 Modélisation du procédé d'osmose inverse

La présentation de la modélisation est effectuée pour différent type de configuration du procédé d'osmose inverse à n étage: procédé sans récupération d'énergie, procédé avec installation d'un système de récupération d'énergie de type échangeur de pression.

#### 2.1.1 Procédé sans installation du système de récupération d'énergie

Ce procédé est le plus simple, la pompe à haute pression joue le rôle d'un récupérateur d'énergie doit permettre d'assurer un débit d'eau à une pression donnée, tout en absorbant le minimum d'énergie, comme indique la figure 4.

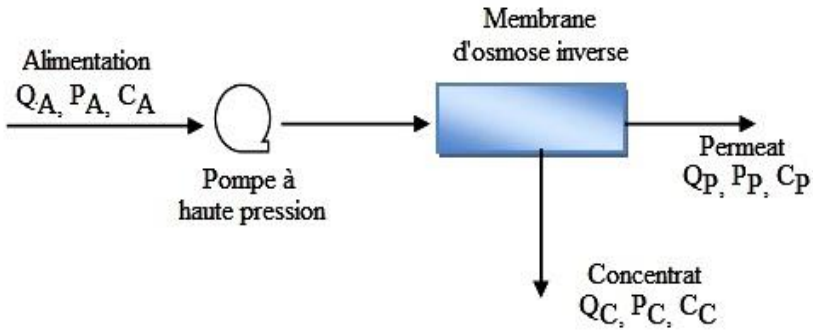


Fig. 4: Procédé d’osmose inverse sans récupération d’énergie

On définit la consommation spécifique d’énergie par l’énergie nécessaire à la production d’un mètre cube de permeat avec une salinité souhaitable [9]. Dans un procédé d’osmose inverse sans installation du système de récupération d’énergie, la sélection de la pompe à haute pression est importante [6, 7]. La consommation spécifique d’énergie est définie sous la forme suivante:

$$cse = \frac{w_{pump}^0}{36.6 \times \eta_p \times Q_p} \tag{1}$$

Le travail de la pompe à haute pression  $w_{pump}^0$  est donné par la relation suivante:

$$w_{pump}^0 = P_A \times Q_A \tag{2}$$

Le rapport entre le débit du permeat et le débit d’alimentation est le taux de conversion est donné sous la formule suivante:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_A} \tag{3}$$

La consommation spécifique d’énergie est calculée à partir de l’équation de travail de la pompe à haute pression  $w_{pump}^0$  et l’équation de taux de conversion  $Y$ :

$$cse = \frac{P_A}{36.6 \times \eta_p \times y} \tag{4}$$

### 2.1.2 Procédé avec installation d’un échangeur de pression

Il existe différents types de systèmes, turbine les plus anciens systèmes, actuellement les échangeurs de pressions sont les plus utilisés grâce à leur efficacité qui peut atteindre plus de 96 % [10], (figure 5).

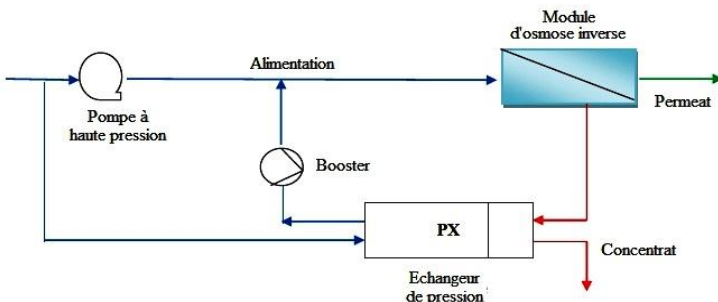


Fig. 5: Système de récupération d’énergie de type échangeur de pression [11]

La consommation spécifique d'énergie du procédé est exprimée sous la forme suivante:

$$cse_{ep} = \frac{P_A \times Q_{A,t}}{36.6 \times \eta_{pump} \times Q_p} \quad (5)$$

**Bilan de matière**

Le débit d'alimentation est défini sous la forme suivante:

$$Q_A = Q_R + Q_p \quad (6)$$

$$Q_R = Q_A (1 - y) \quad (7)$$

$$Q_{A,t} = Q_A - \eta_E \times Q_R \quad (8)$$

D'après les équations (5) et (7), le débit d'alimentation total du procédé sera décrit par l'équation suivante [12]:

$$Q_{A,t} = Q_A - \eta_E \times Q_A (1 - y) \quad (9)$$

A partir de l'équation (8), on calcule la consommation spécifique d'énergie [12]:

$$cse_{ep} (y, p, \eta_p, \eta_E) = \frac{P_A (1 - \eta_E (1 - y))}{36.6 \times \eta_{pump} \times y} \quad (10)$$

**2.2 Méthode de résolution mathématique: méthode du gradient projeté**

L'une des méthodes de résoudre un problème d'optimisation sous contraintes est d'adapter un algorithme du gradient projeté de façon à respecter à chaque pas de l'itération et les contraintes [13]. Les contraintes sur les différents paramètres des équations sont:

$$\begin{cases} 60 \leq P_A \leq 80 \\ 0.45 \leq y \leq 0.47 \\ 0.6 \leq \eta_p \leq 0.85 \\ 0.9 \leq \eta_E \leq 0.99 \end{cases}$$

Le principe de la méthode est basé sur le calcul de gradient de la fonction objective en fonction des différents paramètres et les recalcule, sous les contraintes, afin d'évaluer la consommation spécifique d'énergie.

**2.3 Organigramme de la méthode du gradient projeté**

L'algorithme de la méthode est effectué par un programme développé sous l'environnement du logiciel Matlab qui permettra de minimiser la consommation spécifique d'énergie, ainsi que recalculer les paramètres opérationnels. La figure 6 montre clairement l'organigramme du programme de calcul développé.

**4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

La validation des résultats obtenus par le programme élaboré est effectuée pour trois Méga stations en Algérie: Fouka, Skikda et Beni Saf d'une production d'eau dessalée respectivement 120 000, 100 000 et 200 000 m<sup>3</sup>/j. Le **Tableau 1** résume les résultats d'exécution du programme.

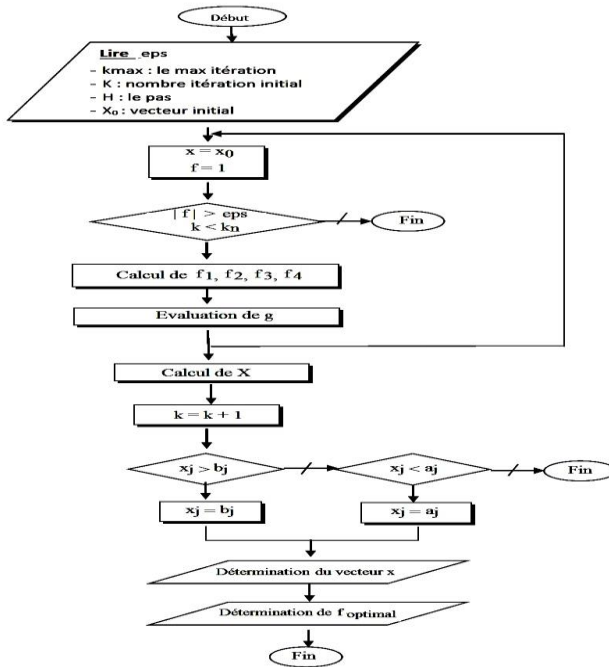


Fig. 6: Organigramme de la méthode de gradient projeté

**Tableau 1:** Résultats de simulation pour les trois usines choisies

		Sans récupération d'énergie (SRE)	Avec échangeur de pression (AEP)
<b>Station de Fouka</b>	Valeur théorique (kWh/m <sup>3</sup> )	4.9	2.3
	Valeur d'exécution (kWh/m <sup>3</sup> )	4.7	2.23
<b>Station Skikda</b>	Valeur théorique (kWh/m <sup>3</sup> )	4.87	2.34
	Valeur d'exécution (kWh/m <sup>3</sup> )	4.56	2.17
<b>Station Béni Saf</b>	Valeur théorique (kWh/m <sup>3</sup> )	5.08	2.53
	Valeur d'exécution (kWh/m <sup>3</sup> )	4.77	2.27

Pour ce faire, l'optimisation des consommations des énergies spécifiques pour les trois stations est illustrée par la figure 7.

Nous avons noté en premier lieu une diminution de la consommation spécifique d'énergie (CSE) enregistrée pour toutes les stations étudiées pour un taux de conversion optimal de 47 %.

A cet effet, les écarts relatifs calculés pour les stations de Fouka, Skikda et Beni Saf sont respectivement de 3 %, 7.8 % et 11.5 %, comme montre la figure 8.

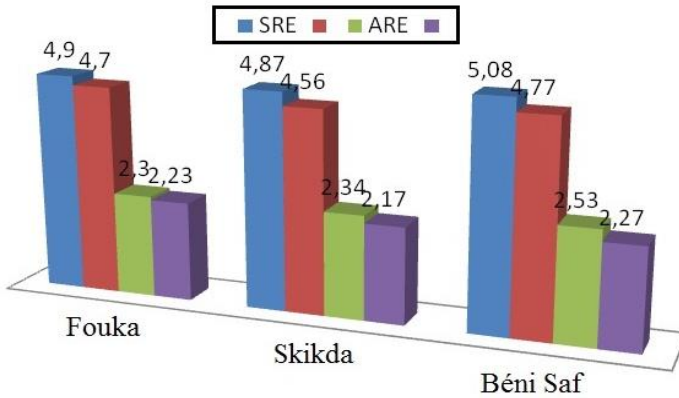


Fig. 7: Evolution de la consommation spécifique d'énergie (CSE kWh/m³) pour les trois usines

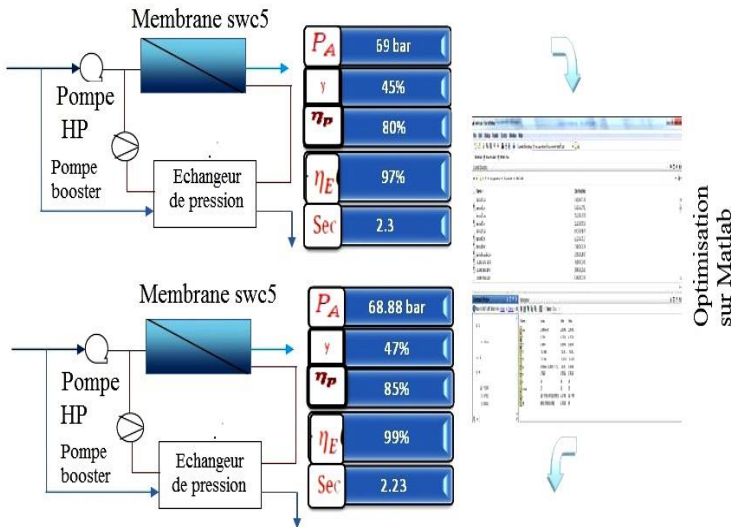


Fig. 8: Présentation d'optimisation de la station de Fouka avec système de récupération échangeur de pression

### 5. CONCLUSION

Une minimisation des consommations énergétiques spécifiques du procédé d'osmose inverse a été mise en œuvre en élaborant un programme sous Matlab en utilisant la méthode du gradient projeté dont le principe de base est le calcul des dérivés sous contraintes.

Par conséquent, plusieurs configurations ont été étudiées à savoir un système sans récupération d'énergie, avec récupération d'énergie de type échangeur de pression PX. Par ailleurs, l'écart enregistré pour la station Fouka est le plus faible par rapport aux autres stations, ce que justifie le bon choix des paramètres utilisés dans cette station.

Il apparaît nettement que le système de récupération d'énergie par un échangeur de pression est de loin le meilleur système permettant d'atteindre une consommation spécifique d'énergie minimale variant de 2.17 à 2.27 kWh/m³.

## NOMENCLATURE

P, Pression d'alimentation; Y, Taux de conversion de la membrane;  $Q_A$ , Débit d'alimentation de l'eau de mer,  $Q_p$ , Débit de permeat;  $Q_R$ , Débit de retentat;  $\eta_E$ , Efficacité de la pompe d'échangeur de pression;  $\eta_{pump}$ , Efficacité de la pompe à haute pression.

## REFERENCES

- [1] Val S. Frenkel, 'Seawater Desalination: Trends and Technologies, Desalination', Trends and Technologies, M. Schorr (Ed.), ISBN: 978-953-307-311-8, 2011.
- [2] H. Boyé, 'Eau, Energie, Dessalement et Changement Climatique en Méditerranée', Août 2008.
- [3] Erik D and Juan MP, 'A Case Study: Energy Use and Process Design Considerations for Four Desalination Projects in California', In: IDA World Congress –Perth Centre Convention et Exhibition (PCEC), Perth, Western Australia, Sep. 4 - 9, 2011.
- [4] A. Arzate, 'Procédés de Séparation Membranaire et leur Application dans l'Industrie Alimentaire', Acer, 642-RVL-0508, Saint-Norbert d'Athabaska, 30 mai 2008.
- [5] A.M.K. El-Ghonemy, 'Waste Energy Recovery in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants, Part I: Review', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 18, pp. 6 – 22, 2013.
- [6] [www.veolia.com](http://www.veolia.com)
- [7] [www.recoveryenergy.com](http://www.recoveryenergy.com)
- [8] B. Peñate, 'Energy Optimization of Existing SWRO (Seawater Reverse Osmosis) Plants with ERT (Energy Recovery Turbines): Technical and Thermo economic Assessment', Energy, Vol. 36, N°1, pp. 613 - 626, 2011.
- [9] Z. Aihua, D. Panagiotis and C. PH, Y, 'Minimization of Energy Consumption for a Two-Pass Membrane Desalination: Effect of Energy Recovery, Membrane Rejection and Retentate Recycling', Journal of Membrane Science, pp. 126 - 137, 2009.
- [10] A. Daussy, M. Guérin et T. Guth, 'Dessalement de l'Eau de Mer à Malte et en Israël', Université de Technologie de Compiègne, 2011.
- [11] M.M. Rahman, C. Lusk and M.J. Guirguis, 'Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices', Master Degree of Science, University of South Florida, 2011.
- [12] H. Dach, 'Comparaison des Opérations de Nanofiltration et d'Osiose Inverse pour le Dessalement Sélectif des Eaux Saumâtres: de l'Echelle du Laboratoire au Pilote Industriel', Thèse de Doctorat, Université d'Angers, Mai 2008.
- [13] J.M. Berland et C. Juery, 'Les Procédés Membranaires pour les Traitements de l'Eau', Document Technique, Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation de la Pêche et des Affaires Rurales, Direction de l'Espèce Rural et de la Forêt, France, Décembre 2002.