



Comparaison des performances des deux procédés membranaires: la Nanofiltration et de l'Osmose inverse dans le Dessalement des eaux saumâtres (Performances comparison of two membranes processes: Nanofiltration and Reverse Osmosis in brackish water Desalination)

N. EL Harrak^{*}, F. Elazhar, S. Belhamidi, M. Elazhar, J. Tour, A. Elmidaoui

*Laboratoire des Procédés de Séparation, Département de Chimie, Université Ibn Tofail Faculté des Sciences, BP 133
Kenitra, Maroc*

Received 14 April 2014; Revised 9 Oct 2014; Accepted 9 Oct 2014.

**Corresponding author email: nada.elharrak@gmail.com*

Abstract

In the south of Morocco, the mobilization of non conventional resources, to supply water has become a strategic choice. The desalination of sea and brackish water is an appropriate solution and a compelling alternative to satisfy the ever growing demand for water. The situation is vulnerable, especially in southern areas suffering water resources absence. This study focuses on the ability to produce potable water from brackish one, using thin-film composite membranes of nanofiltration and reverse osmosis. Based on the recovery rate, global rejection rate, and the desalted water quality, a comparative study is made of the three membranes implemented with an assessment of their performances for brackish water salinity slightly higher than 5 g / L.

Keywords : Desalination, Reverse osmosis, Nanofiltration, Brackish water, Comparison, Energy consumption.

Résumé

Au sud du Maroc, la mobilisation des ressources non conventionnelles pour l'approvisionnement en eau est devenue un choix stratégique de long terme. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres constitue une solution pertinente et une alternative impérative pour satisfaire les besoins toujours croissants en eau. La situation est vulnérable surtout aux zones du sud souffrant d'une absence des ressources d'eau. La présente étude porte principalement sur la possibilité de produire une eau potable, à partir d'une eau saumâtre, en utilisant des membranes commerciales spirales de nanofiltration et d'osmose inverse. Sur la base du taux de conversion, du taux de rejet global et la qualité d'eau dessalée, une étude comparative est effectuée des trois membranes mises en œuvre avec une évaluation de leurs performances pour une eau saumâtre de salinité légèrement supérieure à 5 g/L.

Mots clés : dessalement, osmose inverse, nanofiltration, eau saumâtre, Comparaison, consommation énergétique.

1. Introduction

Au 21^e siècle, la reconnaissance d'une pénurie potentielle de l'eau douce [1]. Par conséquent, pour résoudre le problème de pénurie d'eau dans de nombreuses régions du monde, l'eau de mer n'est plus seulement une ressource en eau marginal pour les pays à ressources limitées [2]. Dans une récente prévision globale de l'industrie, durant les trois dernière année l'industrie du dessalement mondial peut être vu pour être en pleine expansion, et ce n'est que le stade de début de l'expansion du marché du dessalement [3].

Le dessalement est une solution de plus en plus commune pour fournir de l'eau douce dans de nombreuses régions du monde où cette ressource est rare. Parmi toutes les technologies de dessalement, l'osmose inverse est la technologie la plus répandue au niveau international [4-5].

Le procédé d'osmose inverse, s'est développé au cours des 40 dernières années avec une augmentation de 44% de la capacité de production de dessalement à l'échelle mondiale [6]. Un autre procédé membranaire, la Nanofiltration (NF) paraît de plus en plus étudié pour remplacer l'OI dans le dessalement de certaines eaux saumâtres dans les années à venir. Ceci est dû principalement à la nature de ses membranes qui sont plus perméables et aux pressions de travail plus faibles que celles de l'OI. Egalement pour certaines eaux saumâtres, la nanofiltration (NF) est un procédé qui permet de produire des eaux ne nécessitant pas obligatoirement une reminéralisation ou du moins nécessitant un post traitement beaucoup plus allégé que dans le cas de l'OI [7-8].

Le Maroc est parmi les pays méditerranéens menacés par la problématique de la raréfaction des ressources en eau douce. Le stress hydrique tend vers une pénurie d'eau tout en se dirigeant vers le sud du pays où les disponibilités en eau sont inférieures à 1000 m³/hab/an [9]. Dans certaines régions du sud de Maroc, les eaux souterraines ne sont utiles ni à la potabilisation ni même à l'irrigation. En général, la salinité de ces eaux varie entre 1 et 14 g/L comme indiqué sur le tableau 1. A noter que ces valeurs de salinité tendent à augmenter au fil des décennies, suite à l'abaissement remarquable des taux pluviométriques. D'autre part les normes d'eau potable prescrites par l'OMS deviennent de plus en plus exigeantes (salinité inférieur à 1 g/L) [10].

Tableau 1 : Qualité de quelques eaux souterraines au Maroc

Zones	Salinité en (g/L)
Tarfaya	6
Tantan	3
Foum El Oeud	3 à 8
Ain El Ati	4 à 14

Le recours au dessalement s'impose dans les zones du sud du Maroc qui sont caractérisées, rappelons- le, par un climat aride. En 1975 la première unité de production d'eau potable par dessalement d'eau saumâtre avec 5g/l de salinité, a été mise en service à Tarfaya, par électrodialyse, c'est unité est remplacée en 1983 par osmose inverse avec une capacité de 125 m³/jour [11]. L'Office National d'Eau Potable (l'ONEP) au Maroc s'est trouvé obligé de procéder à l'extension des installations du dessalement de l'eau salée par osmose inverse et même de programmer d'en construire d'autres à l'horizon deux décennies prochaines. La réalisation et l'exploitation de ces unités de dessalement a permis de capitaliser un savoir-faire et d'assurer l'introduction des techniques les plus adaptées au Maroc [12-13]. Le dessalement par des procédés membranaires a montré son efficacité dans le monde. De nombreux travaux ont été effectués à l'échelle du laboratoire, en matière de dessalement des eaux saumâtres et des effluents industriels [14-15-16].

Dans l'objectif d'atteindre une qualité conforme aux normes de potabilisation, cette étude de recherche est focalisée sur le dessalement d'une eau saumâtre de salinité de l'ordre de 5g/L, utilisant un pilote semi industriel de Nanofiltration/Osmose inverse. Dans ce travail, deux membranes de nanofiltration (NF90et NF270) et une d'osmose inverse (TM710) sont comparée pour la réalisation d'une étude quantitative et qualitative en tenant compte l'aspect énergétique.

2. Matériels et méthodes

2.1. Eau à traiter

L'eau à traiter est obtenue en enrichissant, une eau de puits de conductivité comprise entre 700 et 800 µS/Cm, par les sels minéraux : NaCl, CaSO₄, CaCO₃ et MgCl₂, de manière à atteindre une salinité totale voisine à 5.2 g/L. Le tableau 2, regroupe les caractéristiques physico-chimiques de l'eau saumâtre à traiter. Cette eau est caractérisée par une dureté élevée, fortes teneurs en sulfate, en bicarbonate et très riche en ions chlorure et sodium.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute

	Composition initiale	Salinité < 6g/L	Normes (OMS)	Normes Marocaines
pH	6.23	7.5	6.5-8.5	6.5-8.5
Température (°C)	25	25	25	25
Turbidité (NTU)	<1	<1	<5	<5
TDS (mg/L)	750	5060	<1000	1000-2000
TH (°F)	25	96	50	-
TAC (°F)	10	26	-	-
Ca ²⁺ (mg/L)	45	248	<270	<500
Mg ²⁺ (mg/L)	20	79	<50	100
Na ⁺ (mg/L)	125	1453	<200	<200
K ⁺ (mg/L)	6	6	-	-
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	123	318	-	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	178	317	<200	200
Cl ⁻ (mg/L)	227	2483	<250	350-750
NO ₃ ⁻ (mg/L)	27	40	<50	<50

II.2. Pilote utilisé

Le pilote de nanofiltration et d'osmose inverse fourni par la société française TIA (figure 1) est constitué d'un bac d'alimentation (B) d'une capacité de 150L, d'une pompe (P) model CAT PUMP qui offre une pression allant jusqu'à 100 bars. La vanne V1 permet de contrôler la pression d'entrée. La vanne V2 permet de contrôler le débit du concentrât et par conséquent le taux de conversion. Dans ce cas, les essais ont été conduits en configuration simpl pass continu à un débit maximum du concentrât. Le pilote est constitué de deux modules spiralés en série. Le concentrât du premier module est admis dans le deuxième module. La perte de charge est de 2 bars, un bar par module. Les caractéristiques des membranes utilisées sont présentées dans le tableau 3.

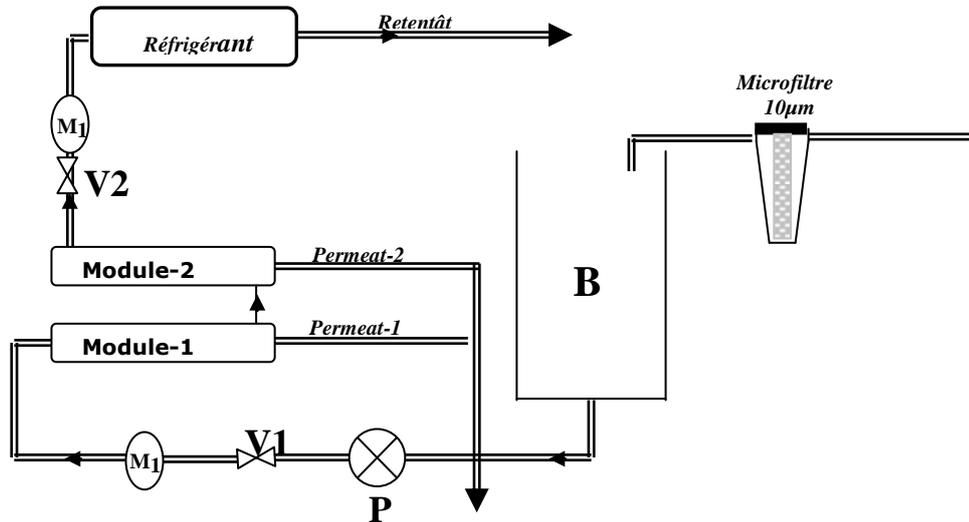


Figure 1 : Pilote de nanofiltration /osmose inverse

Où B: bac d'alimentation; P: pompe; V1, V2: vannes; M1, M2: manomètres

Tableau 3 : Caractéristiques des membranes testées

Membrane	NF904040	NF270 4040	TM710
Pression maximale (Bar)	41	41	41
Surface active (m ²)	7.6	7.6	7
pH toléré durant le traitement	3 à 10	3 à 10	2 à 11
Température maximale admise (°C)	45	45	45
Seuil de coupure (Dalton)	90	270	-
Teneur admise du chlore libre (ppm)	0.1	0.1	-
Indice de colmatage (SDI)	<5	<5	<5

Les membranes sont conservées habituellement à 4°C dans l'eau déionisée pour une période inférieure à trois jours. Au-delà de trois jours, la conservation est assurée dans une solution de métabisulfite de sodium et à 4°C.

II.3. Analyse théorique

L'analyse théorique des caractéristiques des membranes testées, est réalisée selon les méthodes standards du transfert membranaire préalablement décrites [17-18-19].

- Le taux de rejet des ions est déterminé par le rapport de la concentration du perméat C_p sur celle initiale C_0 , exprimé par la relation (1):

$$R (\%) = [(1-C_p)/C_0] \times 100 \quad (1)$$

- Taux de conversion (%Y), est représenté par la formule (2). C'est le quotient du débit d'eau produit par le débit d'eau d'alimentation :

$$Y (\%) = \frac{Q_{\text{Perméat}}}{Q_{\text{Alimentation}}} \quad (2)$$

- Flux du perméat J_p , est déterminé par la relation (3), c'est l'expression du débit du perméat $Q_{\text{perméat}}$ par rapport à la surface active de la membrane :

$$J_p (L/h.m^2) = \frac{Q_{\text{Perméat}}}{S_{\text{active}}} \quad (3)$$

- La perméabilité des membranes testées est exprimée par la formule (4) :

$$A = \frac{J_p}{\Delta P} \quad (4)$$

où J_p est le flux du perméat, ΔP (en bar) est la pression transmembranaire.

- L'énergie de consommation est proportionnelle à la pression, elle est donnée par la relation (5) :

$$E = \frac{\Delta P \times 100}{\eta \cdot Y \times 36} \quad (5)$$

Avec E en kWh/m³

ΔP : Pression transmembranaire en bars,

η : Efficacité globale de la pompe est égale à 80%,

Y : Taux de conversion.

3. Résultats et discussion

Une étude comparative est menée sur la membrane d'osmose inverse (TM710) et les deux membranes de nanofiltration (NF270 et NF90). Dans un premier temps un calcul de perméabilité de l'eau brute est réalisée pour chacune des trois membranes testées. La figure 2 montre la variation du flux de perméat en fonction de la pression appliquée pour les trois membranes testées. La courbe de variation de la pression transmembranaire en fonction du débit du perméat pour chaque pression appliquée, permet d'en déduire les valeurs de perméabilité représentées dans le tableau 4.

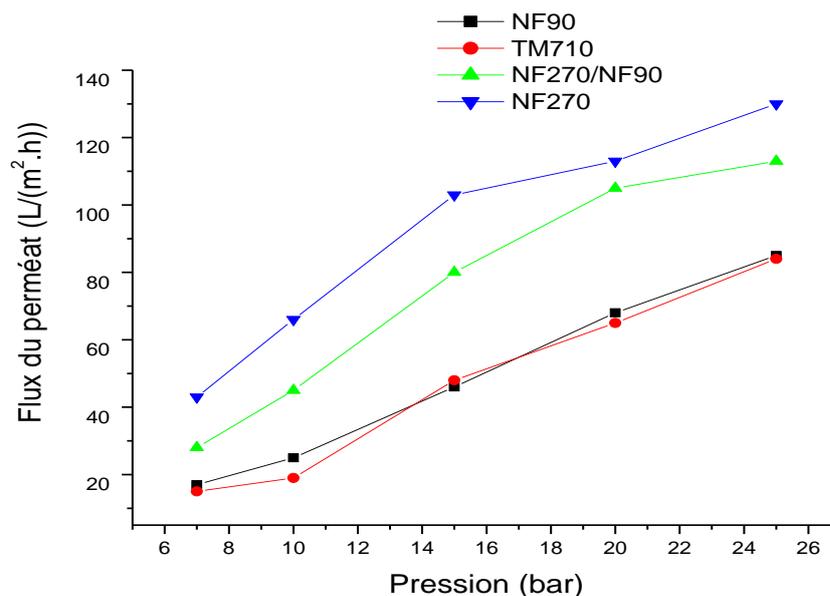


Figure 2 : Variation du flux de perméat en fonction de la pression appliquée

Tableau 4 : valeurs de perméabilité des trois membranes testées à l'eau brute

Membranes	Perméabilité à l'eau brute (L/h.m ² .bar)
NF270	5.33
NF90	4.49
TM710	4.11

L'examen des résultats montre que les membranes de NF sont plus perméables que la membrane d'osmose inverse (OI), due à la présence de nanoporosité en NF alors que la membrane d'OI est dense.

Pour étudier l'effet de la pression sur les performances des membranes testées dans la configuration simple pass. Les tests de dessalement ont été menés sous les conditions suivantes pour les trois membranes testées:

- ✓ Les pressions d'entrée sont 7,10, 15, 20 et 25 bars ;
- ✓ Le débit initial du perméat total est de l'ordre de 700 l/h pour la NF 90, 1550 l/h pour la NF270, 670 l/h pour la TM710 et 1245 l/h pour la NF270/NF90.

Les figures 3, 4 et 5 illustrent les résultats enregistrés, taux de conversion, la teneur des sels total (TDS) et des ions chlorure et sodium et du taux de rétention (R) pour les 3 membranes utilisées et aussi pour la combinaison NF270/NF90.

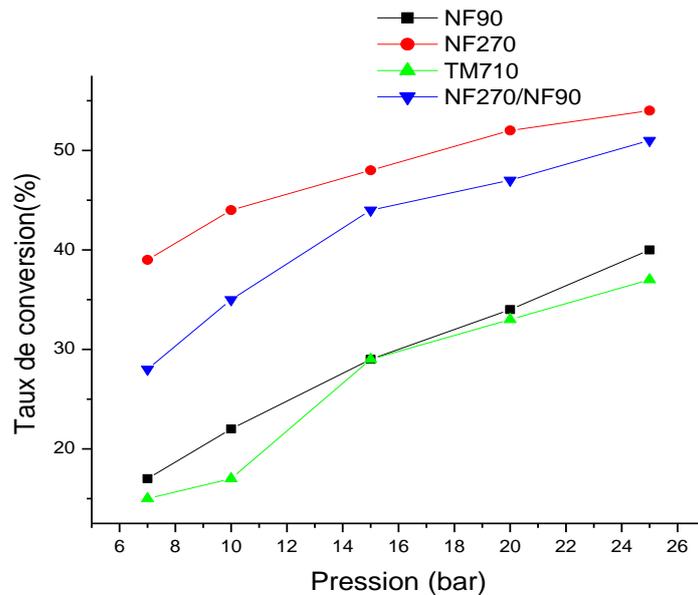


Figure 3 : Variation du taux de conversion (Tc%) en fonction de la pression appliquée

Les résultats montrent que le taux de conversion augmente avec l'augmentation de la pression appliquée pour chaque membrane testée. Ceci est expliqué par l'augmentation de débit du perméat avec l'élévation de la pression appliquée. Dans la gamme de pression étudiée, l'ordre du taux de conversion pour les trois membranes est le suivant :

$$\text{NF270-4040} > \text{NF270 / NF90} > \text{NF90-4040} > \text{TM710}$$

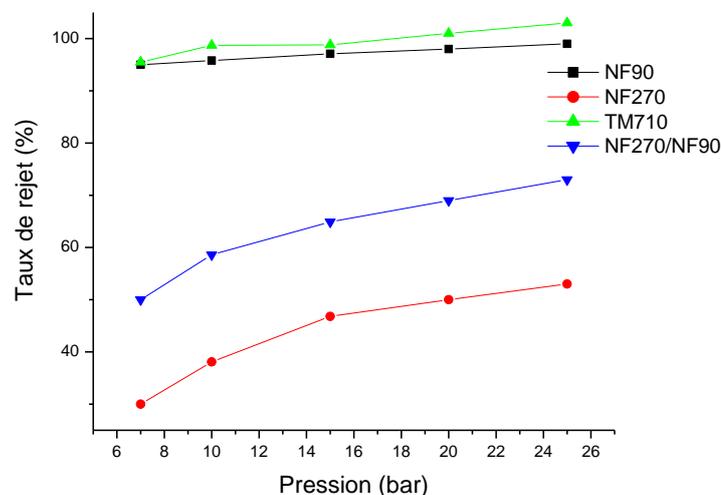


Figure 4 : Variation du taux de rejet global (R%) en fonction de la pression appliquée

✓ La membrane TM710 présente le plus haut taux de rejet pour l'ensemble des ions. Ceci est en accord avec les prévisions attendus pour une telle membrane d'osmose inverse dense, dont la sélectivité est basée principalement sur la diffusion et ne dépend pas de la taille.

✓ La membrane NF90 présente des performances proches de la membrane TM710 au terme de taux de rejet des sels et des différents ions. Ceci est en accord avec une telle membrane de nanofiltration dont la sélectivité est basée sur la diffusion.

✓ La membrane NF270 présente des taux de rejet les plus faibles par rapport à NF90 et TM710, ces taux de rejets varient avec la nature des ions. Ceci est expliqué par les mécanismes de transfert convectif et diffusif couplés en NF, le caractère convectif augmente d'avantage pour la membrane NF270 entraînant alors d'avantage de sels dans le perméat.

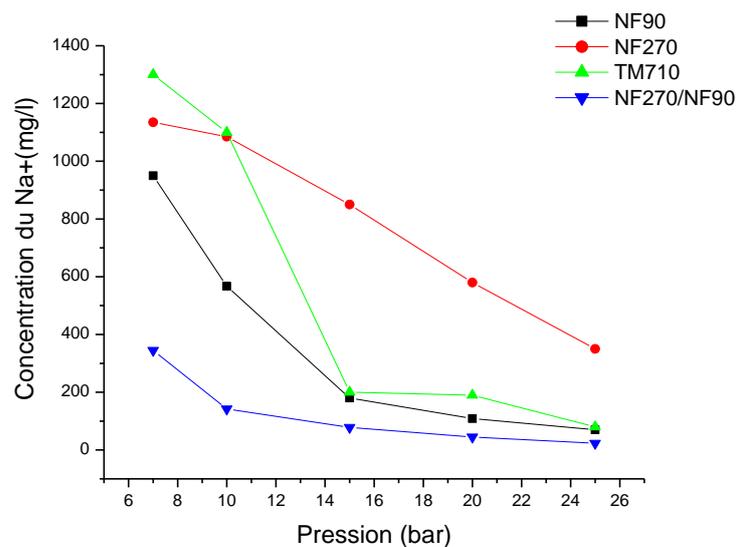


Figure 5 : Variation de la concentration du Na^+ en fonction de la pression appliquée

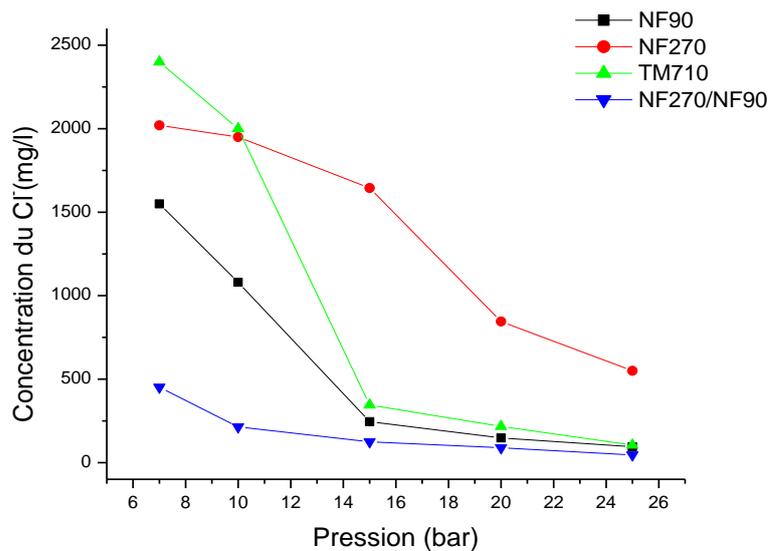


Figure 6 : Variation de la concentration du Cl^- en fonction de la pression appliquée

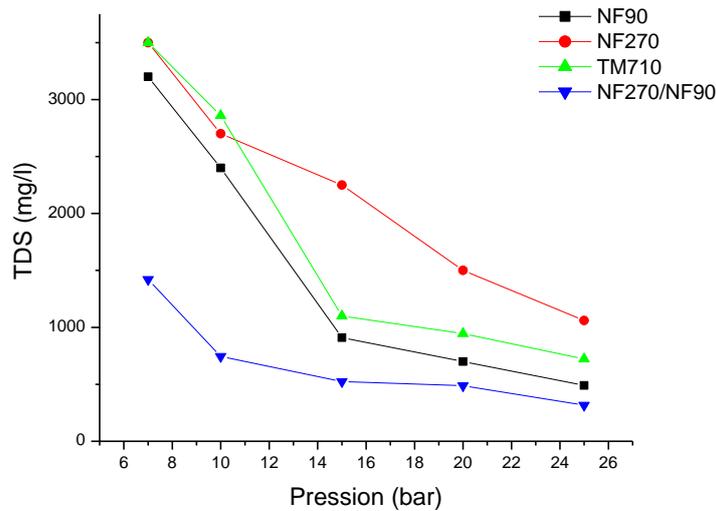


Figure 7: Variation de la teneur du TDS en fonction de la pression appliquée

Les résultats montrent que la qualité du perméat obtenue avec la membrane NF90 est satisfaisante. Cependant les eaux produites par TM710 sont pratiquement déminéralisées d'où la nécessité d'un post de reminéralisation [20-21].

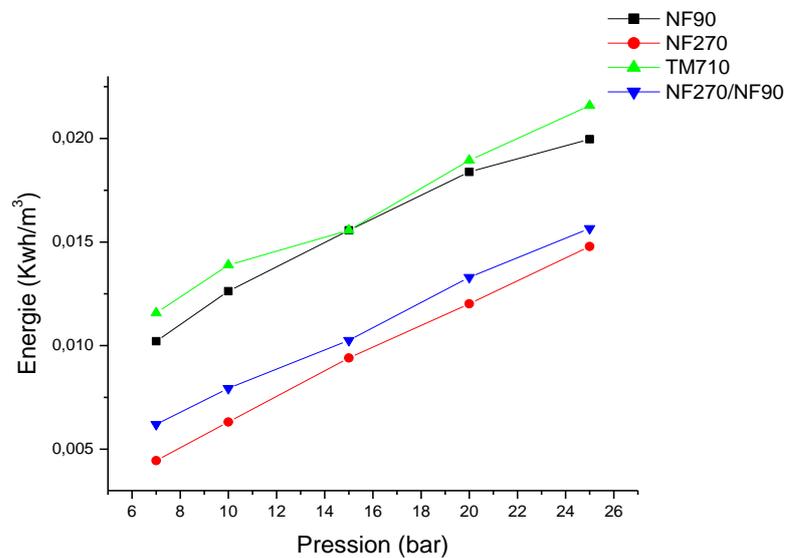


Figure 8 : Variation de l'énergie consommée en fonction de la pression appliquée

Dans le cas de la membrane NF270 la qualité de l'eau produite est satisfaisante en terme de TDS, alors que les teneurs des ions Na^+ et Cl^- dépassent les normes recommandées par la législation marocaine et par l'OMS pour chaque pression appliquée. Ceci impose la nécessité d'un traitement supplémentaire avant distribution.

La qualité de l'eau obtenue par la combinaison NF270/ NF90 et la membrane NF90 est satisfaisante à partir 10 bars pour la combinaison NF270/NF90 et de 15 bars pour la NF90. Cependant ces eaux peuvent être distribuées aux consommateurs.

L'analyse des résultats nous indiquent que l'énergie consommée, augmente dans l'ordre suivant : $\text{NF270} < \text{NF270/NF90} < \text{NF90} < \text{TM710}$. Cependant il est difficile de comparer puisque la qualité de l'eau produite n'est pas la même.

Conclusion

L'ensemble de ces travaux illustre une nouvelle approche dans le domaine des membranes pour la potabilisation de l'eau. Cette approche couple des essais de laboratoire, utiles pour atteindre les caractéristiques des membranes, couplée à l'étude plus fondamentale de la compréhension des mécanismes de transfert de matière en NF et osmose inverse, pour le choix de la meilleure membrane pour la meilleure efficacité pour la potabilisation.

Les performances des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse sont définies, sur la base d'un taux de rejet des membranes relativement important (qualité d'eau dessalée), un débit d'eau produite élevé (taux de conversion), et une qualité physico-chimique du perméat répondant aux normes prescrites par l'OMS. La membrane NF270/NF90 s'est avérée répondre le mieux aux exigences de potabilisation recommandées par l'OMS.

Références

1. Mehdizadeh H., *Desalination*, 191 (2006) 200–209.
2. Is Fatimah, Uun Ayyil Hasanah, Hijrah Purnama Putra. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (6) (2014) 1976-1981.
3. Young M. Kim, Seung J. Kim, Yong S. Kim, Sangho Lee, In S. Kim, Joon Ha Kim, *Desalination*, 238 (2009) 312.
4. Baltasar P., Lourdes G.R., *Desalination*. 284 (2012) 1.
5. Benradi F., A. El Yahyaoui S. Bouhlassa, A. Nounah, E. Cherkaoui, F. Ghrissi. *J. Mater. Environ. Sci.* 4(6) (2013) 832-839
6. Lauren F. G., Desmond F. L., Benny D. F., Benoit M., Philippe M., *Water research* 43 (2009) 2317.
7. Mohan N., Valko M., Horst Chemical, *Desalination* 145 (2002) 207.
8. Elazhar F., El Harrak N., Zdeg A., El Amrani M., Taky M., Elmidaoui A., *Chemical Technology, An Indian Journal*, 7 (2012) 29.
9. Elazhar F., Elamrani M., Taky M., Hafsi M., Elmidaoui A., *International journal of environmental sciences* 3 (2013) 2139.
10. Hafsi M., *Desalination* 134 (2001) 93.
11. World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd denda, Recommendations, 1 (2008) 375.
12. Bzioui M., Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. *Water-Afric*. novembre 2004.
13. Hafsi M., Khaoua A., Ben Abdellah S., El Mghari T.M., *Desalination* 167 (2004) 209.
14. Meihong L., Zhenhua L., Zhihai C., Sanchuan Y., Congjie G., *Desalination* 281 (2011) 372.
15. Vineet K.G., Sun-Tak H., William B. K., Alan R. G., *Desalination* 208 (2007) 1.
16. Elazhar F., Zouhri N., Ait habzize S., Taky M., Elmidaoui A., *Physical and Chemical News*, 58 (2011) 20.
17. Elazhar F., Tahaikt M., Achatei A., Elmidaoui F., Taky M., El Hannouni F., Laaziz I, Jariri S., El Amrani M., and Elmidaoui A., *Desalination*, 249 (2009) 154.
18. Elazhar F., Elazhar M., Hafsi M., and Elmidaoui A., *International Journal of Advanced Chemistry*, 2 (2014) 49.
19. Elazhar F., Tahaikt M., El jalili Z., Taky M., Amor Z., Boughriba A., Hafsi M., and Elmidaoui A., *Cahier de l'Association Scientifique Européenne pour L'Eau et la Santé* 17 (2012) 27.
20. Elazhar F., EL Habbani R., Elazhar M., Hafsi M., and Elmidaoui A., *International Journal of Advanced Chemistry*, 1 (2) (2013) 21.
21. Elazhar F., Tahaikt M., Zouhri N., Zdeg A., Hafsi M., Tahri K., Bari H., Taky M., lamrani M., Elmidaoui A., *Desalination*, 300 (2012) 46.

(2015); <http://www.jmaterenvironsci.com>