

DÉMINÉRALISATION DES EAUX SAUMÂTRES DU SUD TUNISIEN PAR ÉLECTRODIALYSE OU PAR OSMOSE INVERSE

K. Walha^{a*}, R. Ben Amar^a, F. Quemeneur^b, P. Jaouen^b

^a *Faculté des Sciences de Sfax, Laboratoire des Sciences de Matériaux et Environnement (MESLAB),
BP 759, route de Soukra, km 4, Sfax, Tunisie*

^b *Centre de Recherche et de Transfert de Technologies,
Laboratoire de Génie des Procédés Environnement - Agroalimentaire, GEPEA-UMR-CNRS, 6144,
Nantes Atlantique Universités, BP 406 - 44602, 37 Boulevard de l'Université, Saint Nazaire, France*

(Reçu le 17 Novembre 2006, accepté le 25 Septembre 2007)

RÉSUMÉ : Cette étude porte principalement sur la possibilité de produire une eau potable à partir d'eaux saumâtres prélevées du sud Tunisien (salinité entre 3 et 6 g.l⁻¹). Nous avons procédé par électrodialyse ED (en utilisant des membranes sélectives CMX/ACS) pour dessaler l'eau de Gabès de salinité 3g.l⁻¹ et par osmose inverse OI (Membrane : Nanomax 95, Pression = 15 bars, Température 25°C et taux de conversion= 50%) dans le cas de l'eau de Zarzis de salinité 6 g.l⁻¹. Les tendances observées ont été interprétées en termes de propriétés physicochimiques d'ions (rayon ionique hydraté et énergie d'hydratation). Le diluat et le perméat obtenus respectivement par ED (d.d.p=25V) et par OI conservent une certaine salinité nécessaire à la consommation humaine sans nécessiter l'application de traitement complémentaire de reminéralisation.

Mots clés : Eaux saumâtres, Dessalement, Eau potable, Osmose Inverse, Electrodialyse.

ABSTRACT: The contribution of membrane techniques with the aim of producing potable water from brackish water without using chemical reactants has become a reality e.g. the supply of the towns of Gabes and Zarzis (south of Tunisia). The utilization of selective membranes CMX/ACS (selective to monovalent ions) allows one to reduce the contents of monovalent ions (Na⁺ and Cl⁻ which are responsible for the salinity of water) while reducing only slightly the contents of divalent ions. Experiment shows that low mobility of divalent ions in the membrane phase plays a determining role in ion extraction. A pilot equipped with a filmTec RO membrane (Nanomax 95) alimeted with brackish water collected from Zarzis town was operated at 15 bars, 25°C, and up to a water recovery ratio of 50%. The results showed that the RO is actually efficient since it highly reduced the content of inorganic matter present in raw waters (rejection > 95% for the divalent ions and 85% for the monovalent ones).

Keywords : Brackish water, Desalination, Potable water, reverse Osmosis, Electrodialysis.

INTRODUCTION

Pendant de longues périodes, l'eau a été considérée comme une source naturelle gratuite et inépuisable. Or, des études de prospections font apparaître une diminution importante des réserves d'eau. Nombreux sont les pays qui voient leurs ressources en eau disponibles diminuer et qui sont plus particulièrement touchés par l'épuisement des ressources du fait des conditions climatiques et de l'accroissement de la demande en eau, résultat inéluctable de la croissance démographique et du développement économique. La Tunisie vit actuellement le problème d'approvisionnement en eau d'alimentation publique, agricole et industrielle, notamment dans les régions sahariennes avec des années de sécheresse totale. L'un des problèmes essentiels du processus de développement des villes du Sud Tunisien est la recherche de techniques favorisant l'augmentation des potentialités en

* correspondant, tél.: 00 216 74 276 400, fax : 00 216 74 274 437, e-mail: walhakhaled@yahoo.fr

eau potable. Parmi ces potentialités, l'existence de nappes artésiennes représentant une réserve en eau non négligeable qu'il est intéressant d'exploiter pour la mise en valeur du Sahara en général. En effet, au sud de la Tunisie, l'état a mis en exploitation une trentaine de forages artésiens dont le débit de chacun est de 7800 m³/j. Ces eaux saumâtres (salinité comprise entre 3 et 6 g.l⁻¹) ne sont exploitables qu'après dessalement.

Les besoins en eau potable se font de plus en plus criants de par le monde. Le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer et la réutilisation des eaux épurées commencent à connaître un essor certain en Tunisie. Ils sont appelés à fournir 7% des besoins en eau en 2030 [1]. C'est à partir de 1983 que les techniques de dessalement commencent à être utilisées suite à la mise en service de la première station de dessalement pour satisfaire les besoins en eau des îles de Kerkennah dépourvues de ressources d'eaux douces. La capacité de production de cette station est de 4.000 m³/jour. L'expérience Tunisienne dans le domaine de dessalement des eaux est amplement enrichie avec la mise en service de la station de dessalement de Gabès en 1995 dont la capacité est de 22.500 extensible à 30.000 m³/jour. En 1999, la Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux (SONEDE) a mis en service deux autres stations, construites l'une à Djerba et l'autre à Zarzis, dont la capacité de chacune est de 15.000 m³/jour. La capacité nominale de production des eaux dessalées en Tunisie s'élève à 95.000 m³/jour fin 2002 assurée par 60 unités de dessalement. Cette capacité a plus que doublé entre 1995 et 2002 suite à la réalisation des 4 stations de dessalement indiquées ci-dessus [2]. Ces stations ont permis d'améliorer la qualité des eaux desservies dans les villes du Sud-Est Tunisien pour la ramener à 1,5g.l⁻¹ au maximum. Le tableau I illustre la distribution de la quantité d'eau dessalée en fonction du domaine d'utilisation. On voit que l'eau potable représente 59 % de la quantité d'eau dessalée produite avec une capacité de 56.000 m³/jour [3].

Tableau I. Répartition de la capacité de l'eau dessalée en fonction du domaine d'utilisation.

Technique	Eau potable	tourisme	Industrie	Autres	Total
Capacité (m³/jour)	56000	6500	28000	4500	95000
Pourcentage (%)	59	6,8	29,5	4,7	100

Ces dernières années, les systèmes membranaires se sont imposées dans le dessalement des eaux saumâtres ou de mer destinées tant à l'usage domestique que industriel. Les procédés membranaires semblent tout indiqué pour atteindre un tel objectif, sans dénaturer la qualité des constituants, sans ajout de produits chimiques et en excluant la présence de tout organisme pathogène. Le dessalement est aujourd'hui arrivé à la phase de maturité industrielle, et la crise annoncée de l'eau potable pour les prochaines années relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement.

L'électrodialyse est le procédé le plus économique pour le dessalement des eaux dont la salinité est inférieure à 3 g.l⁻¹, alors que l'osmose inverse l'est pour les eaux saumâtres de salinité plus élevée [4, 5], c'est pourquoi nous avons procédé par ED pour le dessalement des eaux de Gabès et par OI pour l'eau de Zarzis.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

I- Solutions à traiter

Nous avons procédé, après prétraitement de microfiltration sur filtre à sable pour éliminer les matières en suspension et réduire la concentration en fer, au dessalement de deux eaux saumâtres ayant des salinités différentes. Il s'agit des eaux d'alimentation des stations de dessalement de Gabès et de Zarzis. Dans le tableau II nous avons rassemblé les résultats des

analyses physico-chimiques de ces deux eaux. Ces dernières sont caractérisées par des duretés élevées, fortes teneurs en sulfate et en chlorure et des salinités élevées: 3 g.l⁻¹ pour l'eau de Gabès et 6 g.l⁻¹ pour celle de Zarzis. L'analyse chimique de la composition des eaux fait apparaître la dominance d'un faciès sulfaté sodique pour l'eau de Gabès et chloruré sodique pour l'eau de Zarzis. Les valeurs de la teneur en Carbone Organique totale (COT) relativement faibles montrent que ces deux eaux sont très peu polluées.

Tableau. II: Analyses physico-chimiques de deux échantillons d'eaux saumâtres du sud Tunisien.

		Eau de Gabès	Eau de Zarzis
pH		7,6	7,8
Conductivité	($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	4100	8400
TDS	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	2583	5292
COT	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1,99	2,84
TH	(°F)	125	123
TAC	(°F)	9,83	13,6
Ca ²⁺	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	365	320
Mg ²⁺	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	81	106
Na ⁺	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	414	1430
K ⁺	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	42,4	25,6
Fe ³⁺	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	0,2	0,1
HCO ₃ ⁻	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	120	167
SO ₄ ²⁻	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1137	1450
Cl ⁻	($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	607	1900

2- Equipements et conditions opératoires

L'électrodialyse consiste à éliminer les sels dissous dans l'eau par migration à travers des membranes échangeuses d'ions sous l'action d'un champ électrique. Un électrolyseur est constitué par un empilement de membranes alternativement échangeuses d'anions et échangeuses de cations, séparées par des compartiments dans lesquels circulent les solutions salines. Lorsque le champ électrique est appliqué, il y aura la concentration des ions dans certains compartiments où la solution s'enrichira en sels (compartiment de concentration), alors que dans les autres la salinité diminuera (compartiment de déminéralisation). L'utilisation des membranes sélectives élimine le risque de colmatage dû à la précipitation du carbonate et du sulfate de calcium et une diminution des ions nitrates et fluorures de l'eau potable qui représentent un danger dans la vie humaine [6, 7]. La sélectivité d'une membrane est l'une des propriétés fondamentales d'une membrane échangeuse d'ions. Elle résulte de la modification de sa surface en déposant une fine couche de polyélectrolyte cationique ou anionique [8 -11]. Ce type de membrane dite sélective permet la séparation des ions de même signe mais de valence différente (figure 1). Les ions polyvalents sont plus retenus par cette couche que les ions monovalents [12].

Les essais d'électrodialyse ont été faits avec une installation pilote Aqualyzer P1 (Corning, EIVS, France) comportant 20 membranes échangeuses de cations CMX-S et 20 membranes échangeuses d'anions ACS placées en alternance dans un bac. La surface membranaire totale est de 0,27 m². Le pilote est formé par 3 circuits dont chacun peut être rempli avec 2 litres de solution (figure 2).

- un circuit contenant la solution à traiter. Cette solution est appelée "diluat" dont la salinité décroît en fonction du temps d'électrodialyse.
- un circuit de concentration contenant le "concentrat" de salinité qui croît en fonction du temps.
- un circuit pour le rinçage des électrodes.

Un générateur capable de fonctionner à potentiel constant (max 30V) où à intensité de courant constante (max 3A). Le circuit contenant le diluat est rempli avec de l'eau à déminéraliser. Dans notre cas, il s'agit de l'eau de Gabés. Les deux derniers circuits sont remplis avec une solution de chlorure de sodium de concentration 5 g.l^{-1} . Au cours de l'électrodialyse, des échantillons de diluat sont prélevés toutes les deux minutes pour faire les analyses des cations et des anions.

Les expériences d'osmose inverse ont été menées sur le pilote MILLIPORE équipé d'un module à membrane spirale. Ce pilote est capable de fonctionner à des pressions élevées grâce à une pompe haute pression. La membrane spirale utilisée est le Nanomax 95, fourni par Millipore BioProcess Division. Elle a les caractéristiques suivantes: Matériau: Polypropylène et Polyester avec revêtement époxy, 30,5 cm de long et 4,6 cm de diamètre. La surface membranaire totale est de $0,4 \text{ m}^2$.

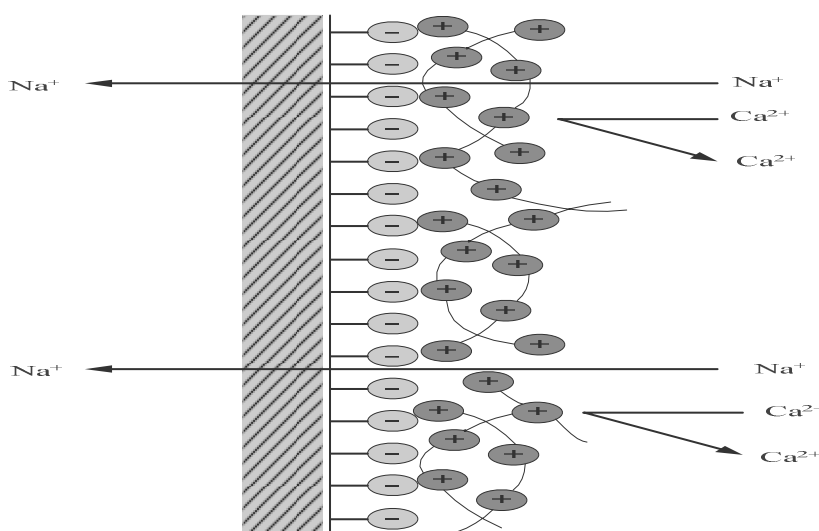


Figure 1. Mécanisme de sélectivité des ions monovalents dans une membrane échangeuse de cations.

3- Analyses

Les concentrations en Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} ont été déterminées par chromatographie ionique (DIONEX DX 120) utilisant la colonne CS 12 A pour les cations et la colonne AS 12 A pour les anions. En osmose inverse, pour calculer le pourcentage d'élimination des polluants contenus dans la solution à traiter par la membrane, on a utilisé l'expression du taux de rétention qui se calcule par la relation suivante:

$$T_R (\%) = 1 - C_p / C_0$$

avec T_R : taux de rétention ; C_0 : la concentration du soluté dans la solution d'alimentation et C_p : la concentration du soluté dans le perméat (diluat).

On définit également le Facteur de Réduction Volumique (FRV) comme étant le rapport du volume du rétentat obtenu (V_R) au volume initial de la solution à traiter (V_0) $\text{FRV} = V_0/V_R$.

Le taux de conversion Y est donné par l'expression : $Y(\%) = V_p/V_0$

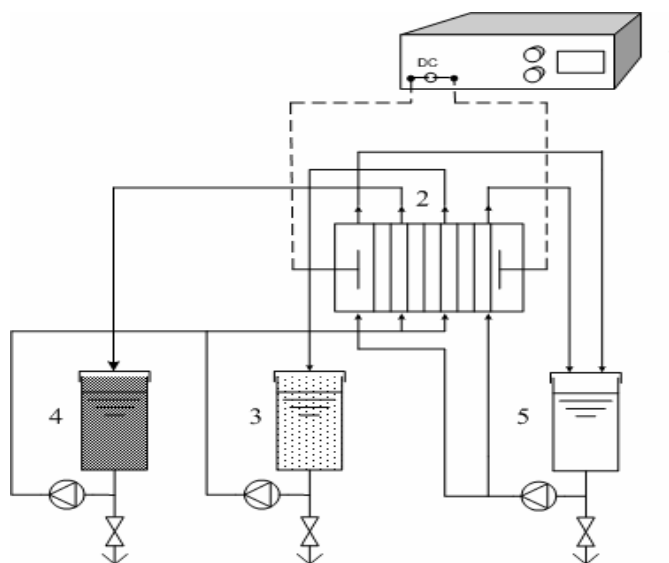


Figure 2. Schéma du montage d'un électrodialyse. 1 : Potentiostat, 2 : cellule membranaire, 3 : compartiment du diluat, 4 : compartiment du concentrat, 5 : compartiment de rinçage des électrodes.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

A- Dessalement de l'eau de Gabès par électrodialyse

Au cours de l'électrodialyse de l'eau de Gabès, nous avons imposé une différence de potentiel (ddp) constante égale à 25 V. Les résultats des analyses des cations et des anions sont rassemblés dans le tableau III. Le traitement par ED de l'eau de Gabès permet d'obtenir une eau potable qui contient une certaine salinité nécessaire à la consommation humaine. Le diluat obtenu respecte les normes pour une eau potable sauf que la concentration en SO_4^{2-} est légèrement supérieure à la valeur recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé OMS (400 mg.l^{-1}) [13]. On observe que le contenu du chlorure dans le compartiment du diluat diminue bien davantage que le contenu en sulfate. L'ion Cl^- est plus mobile que l'ion SO_4^{2-} (Tableau 4) [14]. Pour cette raison cet ion franchit plus facilement la membrane et passe dans le compartiment du concentrat. Par conséquent la concentration en ion Cl^- dans le compartiment du diluat devient de plus en plus faible. Le même raisonnement reste valable pour les cations : l'ion Na^+ , le plus mobile, franchit plus facilement la membrane que les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Tableau III. Variation de la concentration des ions en fonction du temps d'électrodialyse de l'eau de Gabès.

Temps (min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$[\text{Ca}^{2+}]$ (mg.l^{-1})	365	327	290	266	238	200	170	144	120	100
$[\text{Mg}^{2+}]$ (mg.l^{-1})	81	77	63	55	43.8	42	41	40	39	38
$[\text{Na}^+]$ (mg.l^{-1})	414	322	240	160	86	56	39	24	21	20
$[\text{Cl}^-]$ (mg.l^{-1})	604	446	220	67	22	15	13	12	11	11
$[\text{SO}_4^{2-}]$ (mg.l^{-1})	1137	1123	1080	1050	1017	926	790	669	550	463

Tableau IV. Mobilité des ions dans la membrane [14].

Ion	Mobilité ($10^9 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
Na^+	4,39
Ca^{2+}	1,07
Mg^{2+}	0,91
Cl^-	5,57
SO_4^{2-}	1,81

B- Dessalement de l'eau de Zarzis par osmose inverse

Avant de procéder au dessalement de l'eau de Zarzis, nous avons déterminé les conditions optimales. Nous avons étudié en premier lieu l'effet de la pression sur le flux de perméat d'une part et sur le taux de rétention des ions d'autre part et en deuxième lieu l'effet du facteur de réduction volumique sur le taux de rétention des ions. Ces expériences ont été réalisées sur une eau reconstituée dont la composition chimique est comparable à celle de l'eau de Zarzis.

a - Influence de la pression transmembranaire sur le flux de perméat

La figure 3 montre que le flux de perméat augmente avec la pression transmembranaire. En effet, en osmose inverse, les transferts du solvant à travers une membrane semi-perméable se font par solubilisation-diffusion: toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieure de celle-ci sous l'action d'un gradient de concentration ou de pression [15]. Le flux de solvant (eau) à travers la membrane est donné par la relation suivante:

$$J_1 = A (\Delta P - \Delta \Pi) \quad \text{équation (1)}$$

Avec J_1 : flux de l'eau à travers la membrane, A : perméabilité de la membrane à l'eau,
 ΔP : différence de pression de part et d'autre de la membrane,
 $\Delta \Pi$: différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane (constante).

Comme on le voit, pour une membrane ayant un mécanisme de transfert de type diffusionnel, le flux de solvant est directement proportionnel à la pression efficace ($\Delta P - \Delta \Pi$) donc ce flux augmente avec la pression appliquée sur la membrane (ΔP).

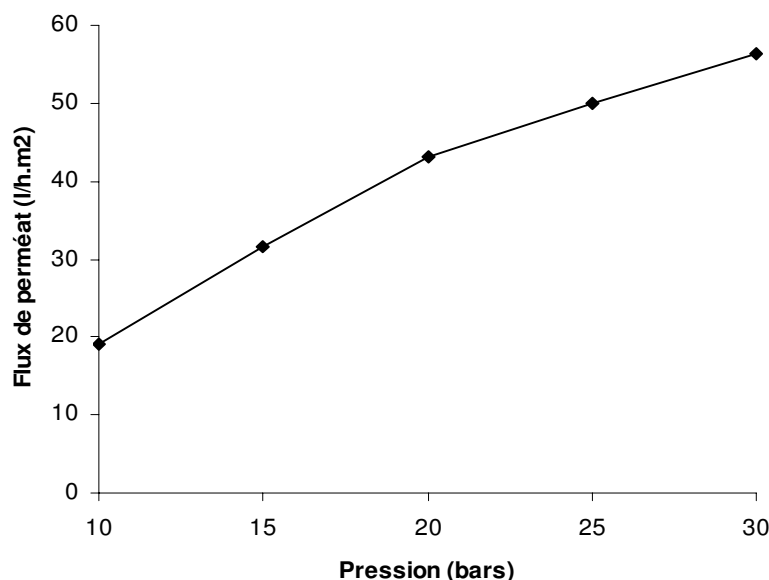


Figure 3. Influence de la pression sur le débit du perméat.

b- Influence de la pression sur le taux de rétention

La figure 4 illustre l'évolution du taux de rétention des anions en fonction de la pression appliquée. L'augmentation du taux de rétention des ions avec l'élévation de la pression transmembranaire s'explique par l'augmentation du débit du solvant. Le soluté se partage dans un volume de solvant plus important, et par conséquent le perméat sera moins concentré. Ce qui entraîne une augmentation du taux de rétention en fonction de la pression. En effet, le flux de soluté (sel) à travers la membrane est :

$$J_2 = B \Delta C \quad \text{équation (2)}$$

Avec J_2 : flux de sel à travers la membrane, B : perméabilité de la membrane au sel, ΔC : différence de concentration en sel de part et d'autre de la membrane

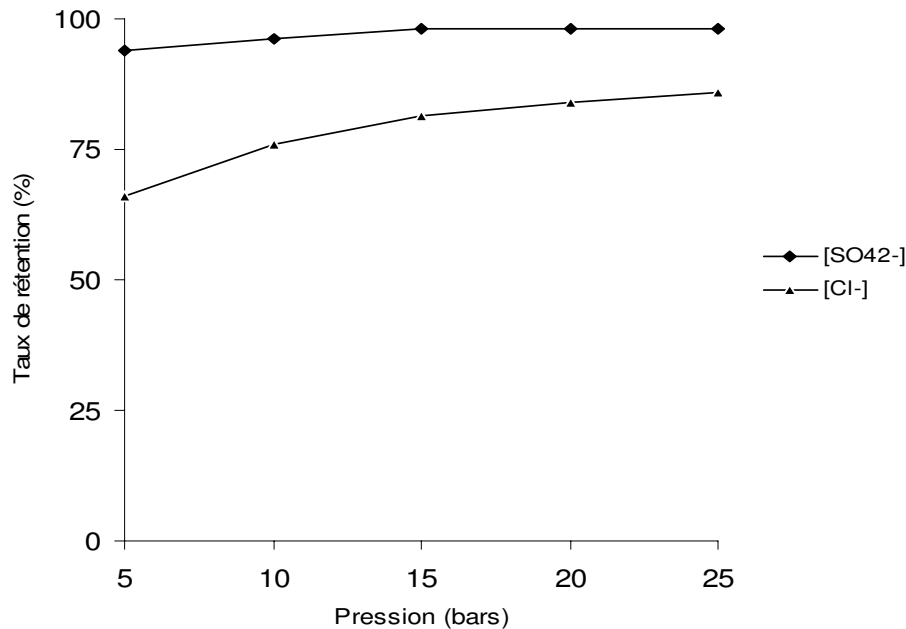


Figure 4. Influence de la pression sur le taux de rétention des anions.

Soient C_o la concentration saline de la solution qui arrive sur la membrane et C_p la concentration saline du perméat. L'équation (2) s'écrit : $J_2 = B \Delta C = B (C_o - C_p)$.

Pour les membranes hautement sélectives, c'est-à-dire où l'on a $C_p \ll C_o$, les équations (1) et (2) peuvent être combinées pour déterminer le taux de rejet de la membrane T_R . Le principe de conservation de masse nous permet d'écrire :

$$J_2 = J_1 C_p$$

d'où,

$$T_R = A (\Delta P - \Delta \Pi) / (A (\Delta P - \Delta \Pi) + B) \quad \text{équation (3)}$$

L'équation (3) montre que le taux de rétention d'une membrane augmente lorsque la pression efficace augmente et tend vers l'unité lorsque la pression efficace tend vers l'infini. En fait, l'expérience montre que cela n'est pas tout à fait le cas. En effet, il y a en général couplage des flux de solvant (eau) et de soluté (sel), ce qui veut dire que, lorsque la pression efficace augmente, le débit de soluté augmente aussi. Il résulte de cela que le taux de rétention ne tendra pas vers 1 (100%) pour les hautes pressions, mais plutôt vers une valeur asymptotique inférieure à l'unité. Les ions polyvalents sont plus retenus que les ions monovalents: $T_R(\text{SO}_4^{2-}) > T_R(\text{Cl}^-)$. Des courbes analogues sont obtenues avec les cations. La séquence de rétention est: $T_R(\text{Ca}^{2+}) > T_R(\text{Mg}^{2+}) > T_R(\text{Na}^+)$.

c- Influence du taux de conversion sur le taux de rétention

La figure 5 montre l'évolution du taux de rétention des ions en fonction du taux de conversion avec une pression appliquée de 15 bars et une température de 25°C. La diminution du taux de rétention des ions avec l'augmentation du taux de conversion s'explique par l'accroissement du phénomène de polarisation de concentration. Le débit du perméat diminue avec l'élévation du taux de conversion et la concentration des ions à côté de la membrane dans le compartiment de la

solution à traiter devient importante. Une augmentation de la concentration au voisinage de la membrane se traduit par une augmentation de la concentration dans le perméat, et par conséquent une diminution du taux de rétention.

La sélectivité d'une membrane d'osmose inverse pour un composé donné, est d'autant plus importante que ce composé est solvaté c'est-à-dire que son énergie d'hydratation est élevée (Tableau V). La légère supériorité de rétention des ions magnésium par rapport aux ions calcium s'explique par la différence des rayons ioniques hydratés: le rayon ionique hydraté du magnésium ainsi que son énergie d'hydratation sont plus grands que ceux du calcium [16].

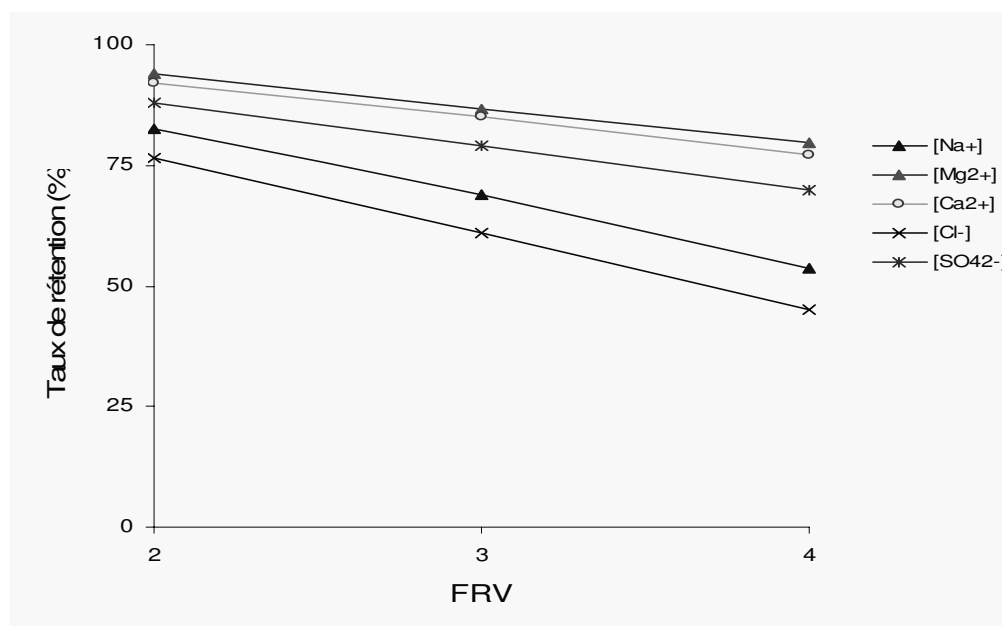


Figure 5. Variation du taux de rétention des ions en fonction du FRV

Tableau 5. Rayon ionique, rayon de l'ion hydraté et énergie d'hydratation de quelques ions [16].

Ion	Rayon ionique (nm)	Rayon ionique de l'ion hydraté (nm)	Energie d'hydratation (KJ.mol ⁻¹)
Na ⁺	0,095	0,365	407
Mg ²⁺	0,074	0,429	1921
Ca ²⁺	0,099	0,349	1584
Cl ⁻	0,181	0,347	376
SO ₄ ²⁻	0,230	0,380	1138

d- Essai de l'osmose inverse sur l'eau de Zarzis

Pour des raisons d'économie d'énergie, la pression transmembranaire ne doit pas être très élevée (sachant que la pression osmotique de cette eau est de l'ordre de 4 bars), le débit du perméat doit être acceptable et ce dernier doit avoir un TDS (Total des Sels Dissous) qui ne dépasse pas les 500 mg.l⁻¹ : valeur fixée par l'OMS pour une eau potable. Pour remplir ces trois conditions, il faut chercher un compromis entre la pression à appliquer, le flux et le TDS du perméat. Au cours du dessalement de l'eau de Zarzis, nous avons adopté les conditions expérimentales suivantes: Pression 15 bars ce qui correspond à un flux de perméat de l'ordre de 32 l.h⁻¹.m⁻². Le FRV maximal qu'on peut atteindre est égale à 2 c-à-d un taux de conversion de 50 % car avec un FRV = 3 (taux

de conversion de 66,6 %), nous avons obtenu un perméat dont le TDS est supérieur à la valeur autorisée par l'OMS. Les résultats des analyses chimiques (tableau VI) du perméat obtenu dans les conditions indiquées ci-dessus montrent que l'OI est efficace. En effet, elle permet de réduire la concentration en éléments inorganiques qui sont présents dans l'eau brute. Le perméat obtenu respecte les normes de l'OMS. En se basant sur les valeurs des énergies d'hydratation des différents ions, on peut expliquer la différence observée entre les taux de rétention des ions bivalents et des monovalents.

Tableau VI: Analyse chimique de l'eau de Zarzis, du perméat, du concentrat et taux de rétention des ions. ($\Delta P = 15$ bars, $T = 25^\circ\text{C}$ et $\text{FRV} = 2$).

	Eau brute	Perméat	Concentrat	T_R (%)
Conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	8400	1160	12460	-
TDS ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	5292	538	7850	-
[Ca ²⁺] ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	320	10	528	96,8
[Mg ²⁺] ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	106	3.4	175	96,8
[Na ⁺] ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1430	183.5	2216.5	87,2
[Cl] ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1900	284	2722.5	85,1
[SO ₄ ²⁻] ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1450	61.5	2190	95,7

CONCLUSION

La déminéralisation des eaux saumâtres est une nécessité pour les régions en situation de pré-stress hydrique. Les procédés membranaires sont particulièrement bien adaptés dans le cas d'une charge organique faible. Parmi ces procédés, l'électrodialyse et l'osmose inverse sont relativement faciles à mettre en œuvre. Cette étude nous a permis de conclure que :

- l'électrodialyse est bien adaptée aux eaux saumâtres dont la salinité est assez faible. Les résultats obtenus confirment que les membranes CMX/ACS sont préférentiellement sélectives aux ions monovalents. Les tendances observées ont été interprétées en termes de propriétés physicochimiques d'ions. Les ions divalents sont moins mobiles, ils limitent le transfert d'ion monovalent pour établir l'électroneutralité dans le compartiment du diluat. Après traitement de l'eau de Gabès par ED, le diluat obtenu conserve un niveau de salinité nécessaire à la consommation humaine.

- l'osmose inverse, qui n'aura à vaincre qu'une faible pression osmotique, réduit la concentration en éléments inorganiques qui sont présents dans l'eau brute. Les taux de rétention sont élevés ($T_R > 95$ % pour les ions divalents et > 85 % pour les monovalents). La sélectivité d'une membrane d'osmose inverse pour un composé donné, est d'autant plus importante que ce composé est solvaté c'est-à-dire que son énergie d'hydratation est élevée. Le perméat obtenu, après traitement de l'eau de Zarzis, respecte les normes de l'OMS. Il contient une certaine salinité nécessaire à l'eau destinée à la consommation humaine et il ne nécessite pas de traitement complémentaire de reminéralisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kamel F., Optimisation de la consommation énergétique dans la station de dessalement de Zarzis ($12,000 \text{ m}^3/\text{j}$), *Desalination*, **2001**, 137, 225.
- [2] Kamel F.: L'expérience tunisienne en matière de dessalement des eaux saumâtres et perspectives, *Actes du colloque international "gouvernance de l'eau et développement durable"* Sousse, Tunisie, 9 & 10 octobre, **2003**.
- [3] Dhahbi M., Desalination in Tunisia, *Watermark*, **2004**, 8.

- [4] Afonso M. D., Jaber. O. J., Mohsen S. M., Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan, *Desalination*, **2004**, 164,157.
- [5] Maurel A., Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, *Edi Tec & Doc*, Paris, **2001**.
- [6] Saracco G., Zanetti M. C., Onofrio M., Novel application of monovalent-ion-permselective membrane to recovery treatment of industrial wastewater by electrodialysis, *Ind. Engng Chem. Res.*, **1993**, 32, 657.
- [7] Saracco G., Zanetti M. C., Ion transport through monovalent-anion-permselective membranes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **1994**, 33, 96
- [8] Sata T., Modification of properties of ions exchange membranes. III. Change of transport properties of cation exchange membranes by various polyelectrolytes, *J. Poly. Sci. Poly. Chem. Ed.*, **1978**, 16, 1063
- [9] Tanaka Y. And Seno M., Treatment of ion exchange membranes to decrease divalent ion permeability, *J. Membr. Sci.*, **1981**, 8, 115.
- [10] Mizutani Y., Ion exchange membranes with preferential permselectivity for monovalent ions, *J. Membr. Sci.*, **1990**, 54, 233.
- [11] Sata T., and Yang W., Studies on cation-exchange membranes having permselectivity between cations in electrodialysis, *J. Membr. Sci.*, **2002**, 206, 31.
- [12] Firdaous L., Quéméneur F., Schlumpf J. P., Maleriat J. P., Jaouen P. Modification of the ionic composition of salt solutions by electrodialysis, *Desalination*, **2004**, 167, 397.
- [13] Memento, *Technique de l'Eau*, Edition du Cinquantenaire , tome 1, **1989**.
- [14] Saracco G., Transport properties of monovalent-ion-permselective membranes, *Chem. Eng. Sci.*, **1997**, 52, 3019.
- [15] Banaoud A. H., Elimination de la dureté des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration, *Desalination*, **2001**, 137, 133.
- [16] Antropov L., Electrochimie théorique, Mir, Moscow, **1975**.