

L'eau, ressource rare ? Gros plan sur le procédé de dessalement par membranes d'osmose inverse

Gustavo Henndel Lopes, Pierrette Guichardon, Nelson Ibaseta et Pierre Haldenwang

Résumé	Le procédé d'osmose inverse s'impose aujourd'hui dans la production d'eau douce par dessalement. Des avancées en matière de prédiction des performances de ce procédé s'avèrent précieuses dans l'optimisation rapide et peu coûteuse des conditions de fonctionnement. L'interaction entre les propriétés de la membrane et les phénomènes prépondérants (polarisation de concentration, pression osmotique...) constitue un problème scientifiquement complexe, traité dans cette étude <i>via</i> une approche modélisation numérique-simulation-expérimentation, une question centrale pour le génie des procédés.
Mots-clés	Dessalement, eau, osmose inverse, modélisation, membrane spiralée, polarisation de concentration, perméabilité.
Abstract	Water, a scarce resource? Focus on the desalination process by reverse osmosis membranes Reverse osmosis is nowadays the predominating process for the production of fresh water by desalination. Progresses in the prediction of reverse osmosis performance are highly valuable for the rapid and inexpensive optimization of the operating conditions. The interaction of the membrane properties and the dominant phenomena (concentration polarization, osmotic pressure...) turns into a complex scientific problem, tackled in this study by a numerical modelling-simulation-experimentation approach, a central topic for chemical engineering.
Keywords	Desalination, water, reverse osmosis, modelling, spiral wound membrane, concentration polarization, permeability.

Dessalement d'eau et place des procédés par membranes

L'eau, ressource rare ? Pas si sûr au regard de la filière du dessalement. En effet, l'eau de mer et les eaux saumâtres représentent plus de 97 % des réserves en eau sur Terre. Ainsi, plus qu'une solution d'avenir, le dessalement est bien l'issue par excellence pour la production d'eau douce qui manque particulièrement dans les pays confrontés au stress hydrique. Tous procédés confondus, la capacité de production mondiale a été multipliée par 40 depuis les années 1970 pour atteindre aujourd'hui plus de 80 milliards de litres d'eau douce par jour, et le secteur est toujours en croissance [1]. Si le dessalement à grande échelle est né avec le développement des procédés de distillation, les procédés membranaires représentent maintenant plus des deux tiers de la capacité de production installée [1] car ils se caractérisent par un certain nombre d'avantages : grande qualité de l'eau produite, production élevée, opération continue à température ambiante, installations compactes et modulables, procédé propre, coût abordable... Ils apparaissent donc comme l'alternative incontournable malgré certains inconvénients (altération et vieillissement des membranes, coût énergétique prohibitif dans le cas de solutions très concentrées...) [2].

L'osmose inverse

L'osmose inverse (OI) est un procédé de séparation hors équilibre à membranes perméables à très haute capacité de rétention de sels. Sa force motrice est la pression ΔP qui génère à travers la membrane des gradients de potentiel chimique de solvant et de soluté. Les membranes composées, le plus souvent en polyamide, polysulfone ou dérivés cellulose [3], sont constituées d'une couche active sélective dense (20-1 000 nm d'épaisseur) supportée mécaniquement par au moins une couche poreuse non sélective (50-100 μm d'épaisseur). Le transfert de matière se produit par solubilisation et par diffusion dans la matrice membranaire [3-5]. La performance du procédé est caractérisée par le flux (à maximiser) et par la concentration de soluté (à minimiser) du perméat ou filtrat, qui dépendent de phénomènes de nature complexe. La différence de pression osmotique des deux côtés de la membrane ($\Delta\Pi$) qui est proportionnelle à la concentration de soluté (e.g. loi de van't Hoff) réduit la force motrice effective du procédé ($\Delta P - \Delta\Pi$) et ainsi le flux de perméat. Le phénomène de polarisation de concentration [6-7] consécutif à l'accumulation du soluté à la surface de la membrane réduit le flux de perméat, car $\Delta\Pi$ croît, et favorise le passage du soluté à travers la membrane.

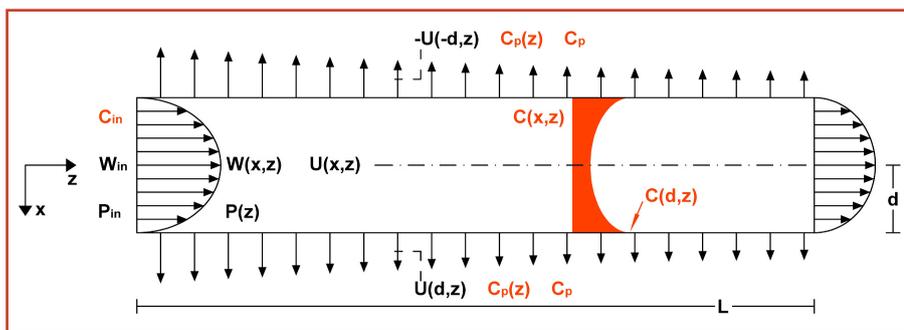


Figure 1 - Schéma du canal plan symétrique 2D limité par deux membranes opérant en mode tangentiel de filtration. Le flux de perméat diminue le long de la membrane en fonction de l'évolution de la couche de polarisation de concentration et de la chute de pression. Le flux axial de solvant et la concentration de soluté sur la membrane évoluent en conséquence.

Modélisation et simulation : pourquoi et comment ?

Rapides, peu coûteuses, pratiques pour optimiser les conditions opératoires, efficaces pour réduire les essais expérimentaux lors de la transition laboratoire-pilote-industrie, la modélisation et la simulation peuvent constituer la voie royale [8]. Néanmoins, l'utilisation isolée de modèles classiques (film, gel, résistances en série, pression osmotique) est limitée car ils ne sont pas prédictifs, dépendent de corrélations empiriques, de coefficients de transfert expérimentaux [6, 9]...

Dans ce contexte, nous développons de nouvelles approches prédictives et modélisons le couplage hydrodynamique-transfert de soluté dans un canal plan (figure 1). Une solution de concentration en soluté C_{in} est alimentée à la pression P_{in} et à la vitesse axiale W_{in} . Une partie traverse la membrane : le flux de perméat $U(d, z)$, qui dépend de la pression effective locale, de concentration $C_p(z)$ (concentration moyenne C_p). Le rétentat ressort à l'autre extrémité du canal. En adoptant le modèle de solubilisation-diffusion, les flux de solvant et de soluté à travers la membrane sont linéaires en $P(z) - \Delta\Pi(C(d, z), C_p(z))$ et en $C(d, z) - C_p(z)$ respectivement à l'aide de la perméabilité au solvant pure, $(l_0)^{-1}$, et au soluté, B . Dans la continuité des travaux de l'équipe [7, 10-11], on résout, sous forme adimensionnelle, pour un écoulement incompressible, stationnaire et laminaire, les équations de conservation de la masse totale (éq. 1), les équations de Navier-Stokes (éq. 2) et l'équation de conservation du soluté (éq. 3) avec l'hypothèse de Prandtl (diffusion axiale négligeable) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$Re_{in}^t \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$Sc \cdot Re_{in}^t \left(u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

Les transferts transmembranaires de solvant et de soluté y interviennent en tant que conditions aux limites. Les quantités $Re_{in}^t = \frac{\rho_0 P_{in} d}{\eta_0 l_0}$ (éq. 4) et $Sc = \frac{\eta_0}{\rho_0 D_0}$ (éq. 5) sont les nombres de Reynolds transverse et de Schmidt, où η_0 est la viscosité dynamique, ρ_0 la masse volumique de la solution et D_0 le coefficient de diffusion du soluté dans le solvant. Les pertes de charge sont intégrées au paramètre α . Le système

est résolu numériquement par un schéma de différences finies du deuxième ordre.

Résultats

Les résultats présentés ici concernent des essais expérimentaux réalisés par nos soins avec la membrane spiralée d'OI BW30-4040 (Dow Filmtec, États-Unis) et des solutions de NaCl. Cette géométrie consiste en un enroulement de membranes planes autour d'un tube collecteur de perméat et écartées de quelques millimètres par un espaceur en forme de grille qui modifie l'écoulement dans le canal et affaiblit la polarisation de concentration [12]. On vérifie (figure 2) qu'il est possible de quantifier cet effet, et ainsi de prédire le flux de perméat et le taux de rétention $(1 - C_p/C_{in})$ en considérant un nombre de Schmidt

« apparent » moindre ($Sc_{app} = \frac{\eta_0}{\rho_0(x \cdot D_0)}$ (éq. 6)), c'est-à-dire un coefficient de diffusion du sel dans l'eau « x » fois (3 à 4) supérieur au coefficient moléculaire [13]. Cela revient à traduire (mathématiquement) la réduction de la concentration sur la membrane par une rétrodiffusion accrue du soluté vers le cœur de l'écoulement. L'influence de la perméabilité au soluté, paramètre d'entrée inconnu, est négligeable sur le flux de perméat mais significative sur la rétention. Elle vaudrait environ $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pouvant être fonction de la concentration. La figure 3 illustre la bonne prédiction du modèle numérique vis-à-vis des différentes expériences. Compte tenu des incertitudes sur la valeur de x et de B , un bon accord existe.

Conclusions et perspectives

Le modèle numérique prédit bien le flux de perméat et le taux de rétention obtenus en osmose inverse à partir d'un ensemble réduit de paramètres. Il permet en outre d'évaluer

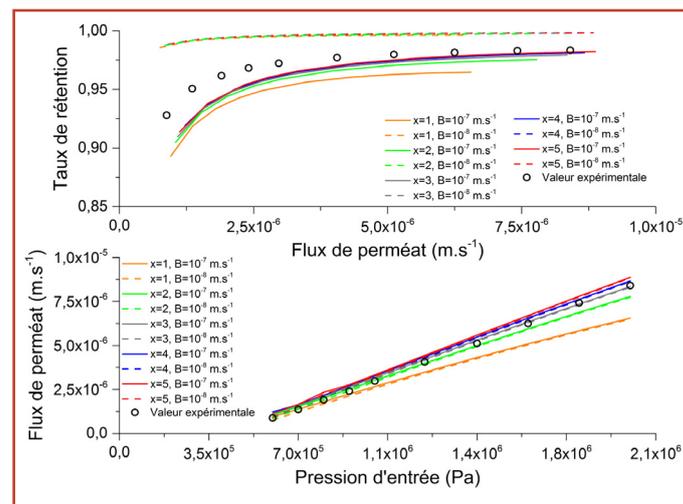


Figure 2 - Comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques pour différentes valeurs de x (éq. 6) et B lors du traitement avec la membrane d'OI BW30-4040 (surface filtrante : $7,6 \text{ m}^2$) d'une solution aqueuse de NaCl ($C_{in} = 5,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Canal plan (avec espaceur) de largeur et longueur $0,96 \text{ m} \times 0,96 \text{ m}$ et $d = 0,43 \text{ mm}$. $W_{in} = 0,055 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $(l_0)^{-1} = 6,8 \times 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. $\eta_0 = 8,9 \times 10^{-4} (1 + 1,63\omega) \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho_0 = 997,1 + 694\omega \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $D_0 = 1,61 \times 10^{-9} (1 - 14\omega) \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ où ω est la fraction massique de soluté [14]. Π est calculée par la loi de van't Hoff.

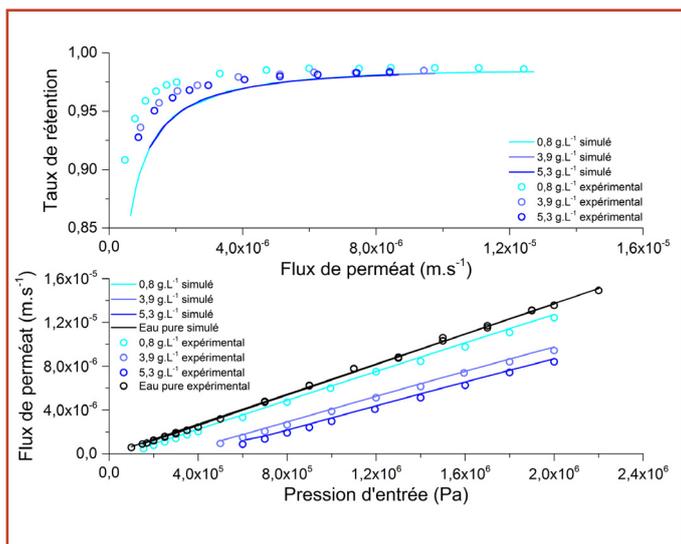


Figure 3 - Comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques pour $x = 4$ et $B = 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour différentes concentrations de NaCl dans les mêmes conditions de la figure 2.

localement d'autres paramètres tels que le champ de vitesses, le profil de concentration et la chute de pression. L'effet de l'espaceur dans le canal d'alimentation sur la modification du transfert de matière peut être décrit à l'aide d'un coefficient de diffusion soluté-solvant apparent plus élevé. Sa prédiction ainsi que l'étude des perméabilités du solvant et du soluté à travers la membrane font, actuellement, l'objet d'études plus approfondies au sein de l'équipe. Le modèle peut constituer, à terme, un outil efficace dans l'optimisation du fonctionnement des installations de dessalement.

Ce projet est cofinancé par le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et par l'École Centrale Marseille.

Références

- [1] Global Water Intelligence, International Desalination Association, Desal Data, *IDA Desalination Yearbook 2013-2014*, Media Analytics, p. 2-5.
- [2] Maurel A., *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce* (2^e éd.), Éditions Tec & Doc, Lavoisier, 2006, p. 139-165, 185-186.
- [3] Strathmann H., *Introduction to Membrane Science and Technology*, Wiley-VCH, 2011.
- [4] Wijmans J.G., Baker R.W., The solution-diffusion model: a review, *J. Membr. Sci.*, 1995, 107, p. 1.
- [5] Paul D.R., Reformulation of the solution-diffusion theory of reverse osmosis, *J. Membr. Sci.*, 2004, 241, p. 371.
- [6] Sablani S.S., Goosen M.F.A., Al-Belushi R. et al., Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review, *Desalination*, 2001, 141, p. 269.
- [7] Haldenwang P., Guichardon P., Chiavassa G. et al., Exact solution to mass transfer in Berman flow: application to concentration polarization combined with osmosis in crossflow membrane filtration, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, 53, p. 3898.
- [8] Dobre T.G., Sanchez Marcano J.G., *Chemical Engineering Modelling, Simulation and Similitude*, Wiley-VCH, 2007, p. 10-21.
- [9] Paris J., Guichardon P., Charbit F., Transport phenomena in ultrafiltration: a new two-dimensional model compared with classical models, *J. Membr. Sci.*, 2002, 207, p. 43.
- [10] Haldenwang P., Laminar flow in a two-dimensional plane channel with local pressure-dependent crossflow, *J. Fluid Mech.*, 2007, 593, p. 463.
- [11] Bernales B., *Modélisation de l'hydrodynamique et des transferts dans les procédés de filtration membranaire*, Thèse de doctorat, Aix Marseille Université, 2013.

- [12] Schwinge J., Neal P.R., Wiley D.E. et al., Spiral wound modules and spacers: review and analysis, *J. Membr. Sci.*, 2004, 242, p. 129.
- [13] Zhou W., Song L., Kwee Guan T., A numerical study on concentration polarization and system performance of spiral wound RO membrane modules, *J. Membr. Sci.*, 2006, 271, p. 38.
- [14] Geraldés V., Semiao V., de Pinho M.N., The effect on mass transfer of momentum and concentration boundary layers at the entrance region of a slit with a nanofiltration membrane wall, *Chem. Eng. Sci.*, 2002, 57, p. 735.



G.H. Lopes

Gustavo Henndel Lopes est doctorant, Pierrette Guichardon (auteur correspondant), professeur, Nelson Ibaseta, maître de conférences, École Centrale Marseille¹ et Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (M2P2 – UMR 7340 CNRS)³.

Pierre Haldenwang est professeur, Aix Marseille Université²⁻³.

¹ École Centrale Marseille, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, F-13451 Marseille Cedex 20.

Courriels : gustavo.lopes@centrale-marseille.fr ;

pierrette.guichardon@centrale-marseille.fr ; nelson.ibaseta@centrale-marseille.fr
² Aix Marseille Université, Technopôle de Château-Gombert, F-13451 Marseille Cedex 20.

Courriel : haldenwang@univ-amu.fr

³ Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (M2P2), UMR 7340 CNRS, Pôle de l'Étoile, Technopôle de Château-Gombert, 38 rue Frédéric Joliot-Curie, F-13451 Marseille Cedex 20.