

Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : les avancées acquises et à venir

Guénaëlle Cartier, GLS et
Pierre Corsin, Fluid Consult

La population mondiale se concentre surtout dans les zones côtières, puisque 70 % des habitants de la planète se trouvent à moins de 250 km d'une côte. C'est dans ces zones que l'augmentation de la population est également la plus forte, cette augmentation n'étant parfois que saisonnière. Dans tous les cas, la demande en eau, que ce soit pour les besoins en eau potable ou pour ceux de l'agriculture et de l'industrie, se faisant de plus en plus forte, les ressources conventionnelles, eaux de surface ou souterraines, sont de plus en plus sollicitées, ce qui entraîne une diminution de leur capacité, aggravée de plus par des déficits pluviométriques pour certaines régions, et par une dégradation de leur qualité. De plus, l'augmentation des puisages dans les ressources d'eau douce des zones côtières, amplifie les risques d'intrusion d'eau de mer dans ces aquifères, ce qui tend à rendre leur eau impropre à la consommation humaine.

Pour faire face à cette situation, l'eau de mer peut constituer une ressource alternative intéressante.

ABSTRACT

Membrane technologies for desalination: state of the art and future trends.

70% of the world population is located in coastal regions (less than 250 km from seaside). Over-exploitation of ground water combined with increasing water demand and water scarcity in certain regions, makes desalination a more and more attractive solution for drinking water production. Costs for desalination have dramatically decreased, making this technology affordable for several countries compared to conventional drinking water production, especially for reverse osmosis technology. Research and innovation go on, and some of present and future trends are presented in this article regarding especially membranes technology, energy savings and pretreatments.

Les vingt-cinq dernières années ont vu se développer les usines de dessalement, tant du point de vue de leur nombre, que de leur capacité, et en particulier concernant celles faisant appel à l'osmose inverse. Les procédés thermiques se développent presque uniquement dans les pays du Moyen-Orient, riches en ressources énergétiques à faible coût.

L'accroissement du marché des usines de dessalement par osmose inverse a entraîné une diminution du prix des membranes, mais aussi une meilleure maîtrise de leur conception et de leur exploitation. Ce qui fait qu'elles deviennent compétitives, au niveau des coûts de production du m³ d'eau,

par rapport à ceux des usines de traitement d'eaux douces qui doivent de plus en plus intégrer des procédés unitaires complexes pour l'élimination de certains éléments indésirables (pesticides, nitrates, micro-polluants divers...), afin de respecter les normes de qualité, de plus en plus exigeantes pour les eaux destinées à la consommation humaine, mais aussi, compte tenu de l'augmentation des besoins en énergie du fait de l'approfondissement des forages et de l'augmentation des taxes de prélèvement.

Le dessalement d'eau de mer en tant que ressource alternative, présente également l'avantage de produire une eau exempte des

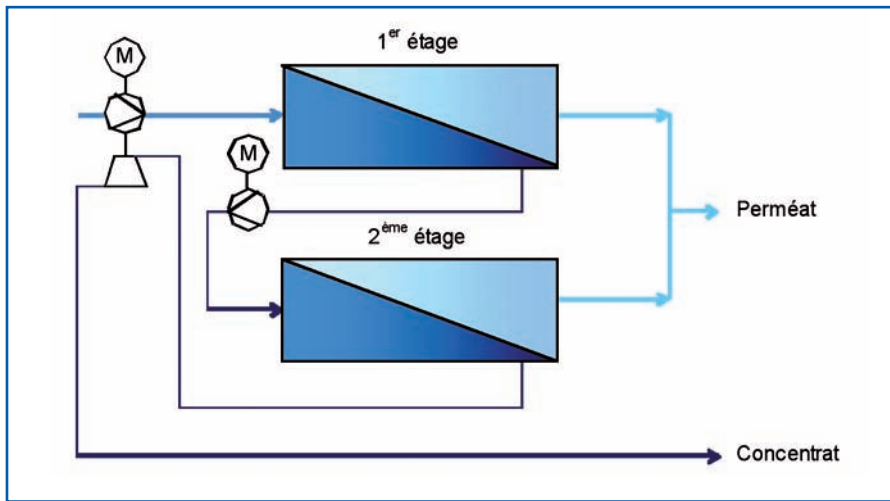


Figure 1 : Système à deux étages utilisant des membranes HP au 2^{ème} étage.

polluants d'origine agricole déjà cités, mais aussi de pouvoir implanter les usines près des zones à forte demande, et ceci sans nécessiter des investissements élevés au niveau du transport de l'eau, ce qui pourrait être le cas de l'utilisation d'autres ressources éloignées d'eau douce pour suppléer au déficit des aquifères côtiers. Une partie de la production des usines de dessalement peut être destinée aussi à la protection de ces aquifères contre les intrusions d'eau de mer, en constituant des barrières hydrauliques.

L'intérêt grandissant du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse pousse tous les intervenants, fabricants de membranes et d'équipements, concepteurs et exploitants d'usines, à poursuivre leurs efforts en recherche et développement, afin d'améliorer encore la technologie, pourtant arrivée en 2005 à une maturité certaine.

Le présent article fait le point sur les dernières avancées et évoque les cibles choisies

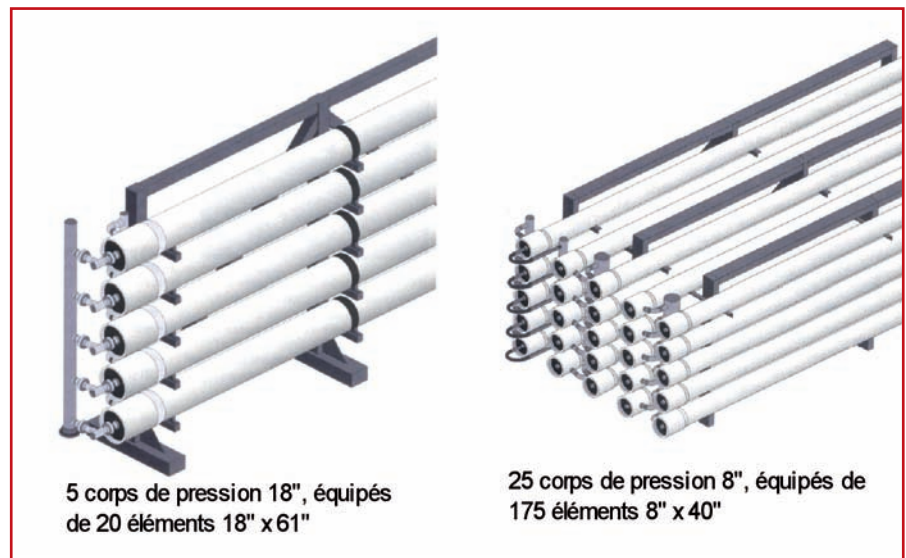


Figure 2 : Comparaison entre deux skids, l'un équipé d'éléments de 18" x 61", l'autre équipé d'éléments standards de 8" x 40", pour une même capacité de production.

pour les développements en cours. Les principaux axes de développement concernent principalement :

- les membranes et leur mise en œuvre ;

- la réduction des besoins en énergie ;
- les prétraitements à faire subir à l'eau de mer, afin qu'elle soit apte à alimenter les modules membranaires.

Les membranes d'osmose inverse

Les développements concernent essentiellement les membranes en film mince configurées en spirale, car il n'existe plus qu'un seul fabricant de membranes en fibres creuses (Toyobo - Japon), alors que les éléments spiralés sont produits par une dizaine de fabri-

cants, dont les quatre plus importants sont Dow-Filmtec (USA), Hydranautics (USA - Japon), Koch Membrane Systems (USA), Toray (Japon).

Les derniers développements et les recherches en cours portent sur des membranes :

- peu sensibles au colmatage par les colloïdes et à l'encrassement par les micro-organismes, et ceci en développant des membranes présentant des surfaces les plus lisses possibles pour éviter les microzones mortes, et en diminuant leur charge électrostatique de surface pour limiter l'attraction d'éléments présentant des charges opposées à celles des membranes ;
- présentant un fort pouvoir de rejet des sels dissous, tout en nécessitant le moins d'énergie possible ;
- résistant aux oxydants, et particulièrement au chlore ;
- supportant des pressions élevées ;
- configurées dans des éléments enfermants

Tableau 1 : Rendement maximum des pompes centrifuges multi-étagées et des turbines de récupération Pelton

Pompe multi-étagée		Turbine Pelton	
Débit (m ³ /h)	Rendement maximum (%)	Débit concentrat (m ³ /h)	Rendement maximum (%)
50 - 80	72	25 - 50	84
80 - 100	74	35 - 60	85
100 - 130	75	40 - 75	85
130 - 160	76	60 - 100	86
160 - 220	78	70 - 130	87
220 - 280	80	90 - 200	88
280 - 330	79	175 - 275	88
330 - 470	81	200 - 350	89
470 - 600	83	225 - 425	89
600 - 750	82	350 - 500	89
750 - 900	84	300 - 625	89
900 - 1 000	85		

le plus de surface membranaire possible, par augmentation de leurs dimensions.

Il est également à signaler trois avancées marquantes, à savoir la mise sur le marché :

- de membranes supportant des pressions d'alimentation élevées de l'ordre de 84 bar alors que les membranes classiques ont des pressions de service de 70 bar. Cette caractéristique permet de concevoir des systèmes à deux étages (figure 1), le premier étant équipé de membranes normales, et dont le concentrat alimente le deuxième équipé de membranes HP. Une pompe de surpression permet d'augmenter la pression afin de compenser l'élévation de la pression osmotique moyenne du concentrat du 2e étage. Cette conception, développée par Toray, permet d'atteindre des facteurs de conversion de 60 %, alors que ceux des systèmes classiques à un étage sont de l'ordre de 40 à 50 %;
- d'éléments spiralés de grandes dimensions. Ainsi la firme Koch Membrane Systems a développé des éléments de 18" (457 mm) de diamètre, de 61" (1.549 mm) de longueur, à

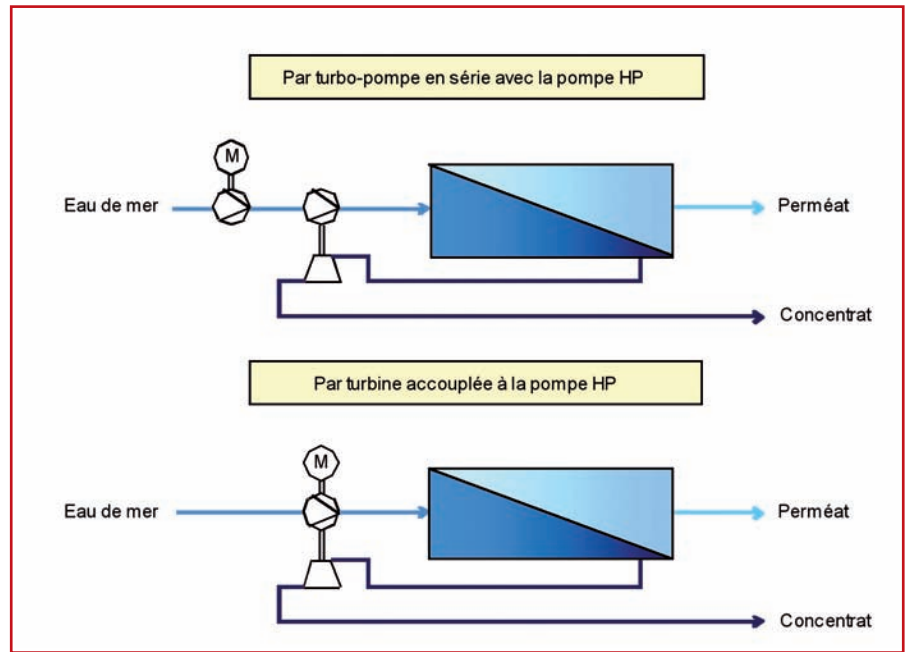


Figure 3 : Principe de récupération de l'énergie du concentrat par turbine Pelton.

les eaux destinées à la consommation humaine.

Il faut également citer, comme autres développements récents :

- les membranes présentant de forts taux de rejet du bore, caractéristique nécessaire pour certaines eaux d'irrigation, en particu-

- les systèmes d'interconnexion entre éléments permettant leur verrouillage, ce qui évite les glissements au niveau des interconnecteurs munis de joints O'ring. On limite ainsi les risques de fuite, et donc la dégradation de la qualité du perméat.

Les besoins en énergie

Dans la structure du coût de production du m³ d'eau douce, l'énergie représente le poste le plus important. On peut estimer les coûts de l'énergie à 30 à 40 % du coût total. Ils sont fonction de la capacité de l'usine, du prix de revient du kWh, et du système adopté pour la récupération de l'énergie hydraulique du concentrat.

Les premières usines de dessalement par voie thermique demandaient l'équivalent de 20 kWh électrique pour produire 1 m³ d'eau douce. Il y a plus de 25 ans, les usines de dessalement, basées sur le principe de l'osmose inverse, consommaient globalement près de 8 kWh/m³. L'introduction des systèmes de récupération de l'énergie du

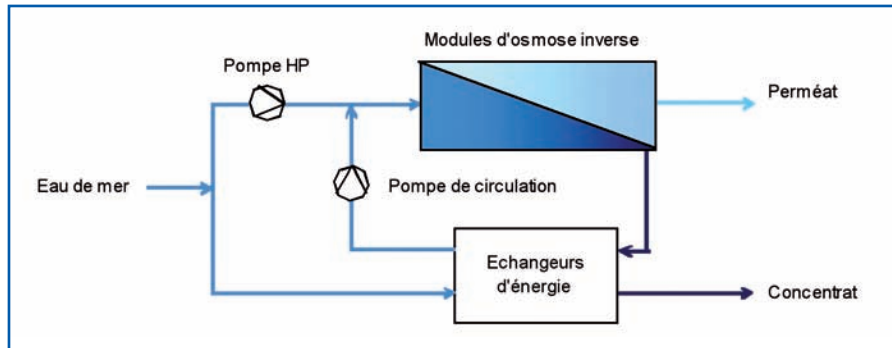


Figure 4 : Principe de fonctionnement des échangeurs d'énergie.

comparer aux éléments standards qui ont des diamètres de 8" et des longueurs de 40". Ces éléments présentent des surfaces membranaires 7,5 fois plus importantes que celles des éléments couramment utilisés. Cette caractéristique permet de diminuer les emprises au sol, le nombre nécessaire de corps de pression, ainsi que le nombre de joints d'étanchéité entre éléments (figure 2);

- de membranes à taux de rejets élevés des sels dissous. Dans les conditions standards d'essais, les taux de certaines membranes atteignent 99,75 %, à comparer aux taux généralement rencontrés, qui sont de l'ordre de 99,4 %. Ce gain peut permettre, pour des eaux chaudes et très salines, de s'affranchir d'une deuxième passe pour atteindre les valeurs de sels dissous totaux, de chlorures et de sulfates dans le perméat, requises pour

lier celles destinées à l'arrosage d'arbres fruitiers, car le bore présent dans l'eau provoque des tâches sur les fruits, ce qui altère leur qualité commerciale;

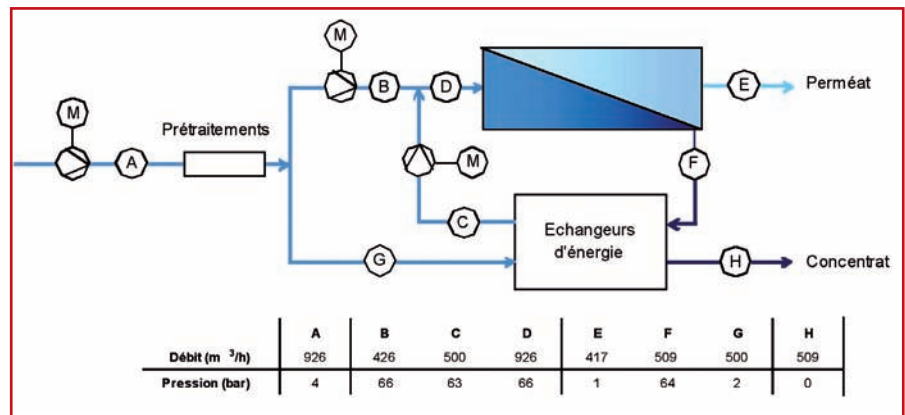


Figure 5 : Débit et pression dans les différents circuits d'une usine de dessalement de 10.000 m³/j équipée d'un système de récupération directe d'énergie.

Tableau 2 : Détermination de la consommation électrique par m³ produit pour un système de récupération directe d'énergie

	Pompe d'alimentation en eau de mer	Pompe haute-pression	Pompe de recirculation
Débit (m ³ /h)	926	426	500
Pression différentielle (bar)	4	64	3
Rendement pompe (%)	82	85	60
Rendement moteur (%)	95	98	93
Puissance absorbée aux bornes du moteur (kW)	132	909	75
Puissance totale absorbée (kW)	1 116		
Énergie consommée par jour (kWh)	26 784		
Énergie consommée par m ³ produit pour le seul système de mise en pression (kWh/m ³)	2,68		
Énergie globale consommée (kWh/m ³) ⁽¹⁾	estimée à 3,2		

⁽¹⁾ Énergie mesurée au compteur tenant compte du pompage en mer, de l'éclairage, de la ventilation, de la climatisation, des pertes en ligne, du rendement du poste de transformation (hors énergie pour la distribution de l'eau traitée)

concentrat, à l'aide de turbines Pelton (figure 3), a fait baisser cette consommation à 5,0 kWh/m³ environ, pour atteindre aujourd'hui pour les usines de dessalement de capacité importante, 3,2 kWh/m³ (tableau 2). Cette amélioration est due à la mise sur le marché de pompes et de turbines de grandes capacités et à l'amélioration de la conception hydraulique de ces machines, et des techniques d'usinage. Le tableau 1, donne les rendements pour différents débits de pompes HP et des turbines Pelton. Étant donné les différences de rendement en fonction des débits, il est toujours souhaitable d'annoncer des valeurs de consommation rattachées à la capacité des usines, ce qui n'est pas toujours le cas. Ainsi pour une usine de 800 m³/j de capacité et un facteur de conversion de 40 %, le rendement global est de 60 % pour les seules pompes et turbine. Si la capacité passe à 10.000 m³/j, le rendement global est alors de 75 %.

Il y a cinq ans environ, il est apparu sur le marché un autre système de récupération de l'énergie hydraulique du concentrat (figure 4). Il s'agit d'échangeurs d'énergie qui permettent de récupérer directement l'énergie sans passer par une transformation mécanique, comme c'est le cas pour les turbines Pelton ou Francis.

Les échangeurs d'énergie, présentant un ren-

dement de 95 %, permettent d'améliorer considérablement le taux de récupération de l'énergie du concentrat, comme le démontre le calcul (figure 5 et tableau 2) basé sur une usine de 10.000 m³/j (facteur de conversion 45 % - pression d'alimentation 65 bar - contre-pression 1 bar sur perméat). Un calcul similaire effectué pour une usine de mêmes caractéristiques, mais utilisant un système de récupération par turbine Pelton, conduit à une augmentation de la consommation de 0,4 kWh/m³.

Le dispositif de récupération directe de l'énergie permet donc d'économiser 13 % de l'énergie, ce qui est loin d'être négligeable.

Cette économie peut être considérée comme optimiste, car le calcul a été effectué en prenant en compte les rendements maximums des pompes et des turbines (voir tableau 1). Or il est à craindre que ce ne soit pas toujours le cas, tant au niveau de la conception, que de celui l'exploitation, les points réels de fonctionnement pouvant être plus ou moins éloignés des points optimaux.

Par contre, cette économie est augmentée pour les petites et moyennes capacités d'usines de dessalement, du fait que le rendement des récupérateurs directs d'énergie reste constant quelque soit le débit, alors que celui des turbines baissent avec le débit.

Il est à noter que toutes les améliorations pouvant être apportées au niveau des membranes (augmentation de la densité du flux transmembranaire, du taux de conversion et du taux d'élimination des sels dissous) s'accompagne d'une augmentation de la consommation en énergie, comme l'indique le tableau 3, basé sur une membrane présentant un taux d'élimination des sels de 99,75 % et une eau de mer présentant une salinité de 34,5 g/l et une température de 15 °C.

Ainsi pour chaque cas il est nécessaire de rechercher l'optimum, en termes d'investissement et d'exploitation, en fonction des données technico-économiques du site d'implantation de l'usine, et des attentes de l'exploitant.

Les prétraitements

Pour assurer une longue durée de vie, au-delà des trois ans de garantie accordés par les fournisseurs d'éléments d'osmose inverse, et atteindre cinq à dix ans, le prétraitement de l'eau d'alimentation des modules doit permettre d'éviter, ou tout au moins limiter, le colmatage, l'entartrage et la salissure des membranes par :

- les algues, le plancton ;
- les colloïdes ;
- les hydrocarbures ;
- les hydroxydes métalliques ;
- la précipitation des sels ;
- les matières organiques ;
- les micro-organismes.

Les prétraitements consistent à :

- éliminer les algues, le plancton, les hydrocarbures, par flottation par exemple ;
- retenir les colloïdes, dans une filière de clarification filtration ;
- empêcher la précipitation des sels dissous et des sels métalliques dans la zone concentrat, par injection d'acide et/ou de séquestrant ;
- limiter le nombre de micro-organismes et

Tableau 3 : Évolution de la consommation électrique en fonction de certains paramètres d'exploitation des membranes

Paramètre	Conditions d'exploitation	Gamme d'évolution du paramètre	Augmentation correspondante de la consommation électrique
Densité du flux du perméat (l.h ⁻¹ .j ⁻¹)	Facteur de conversion 45 % Densité de flux : 300	245 → 367	~ 20 %
Facteur de conversion (%)		35 → 50	~ 15 %
Taux d'élimination standard des sels dissous (%)	Densité de flux : 300	~ 23 %	
Facteur de conversion : 45 %	99,4 → 99,75		

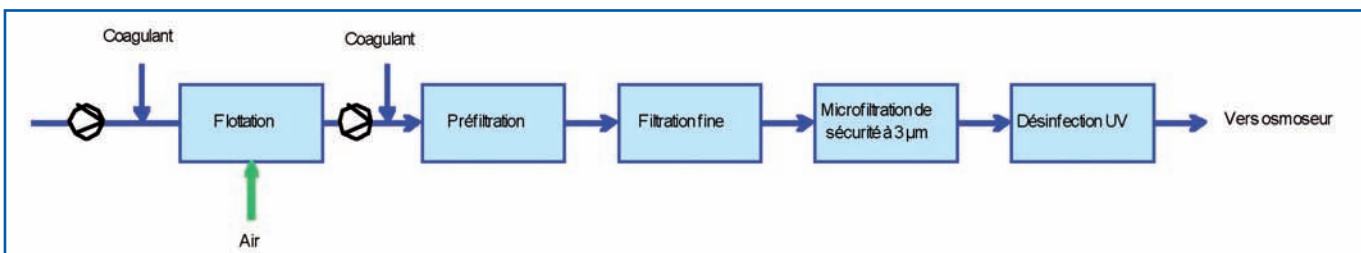


Figure 6: Prétraitements d'eau de mer difficiles, faisant appel à des traitements conventionnels.

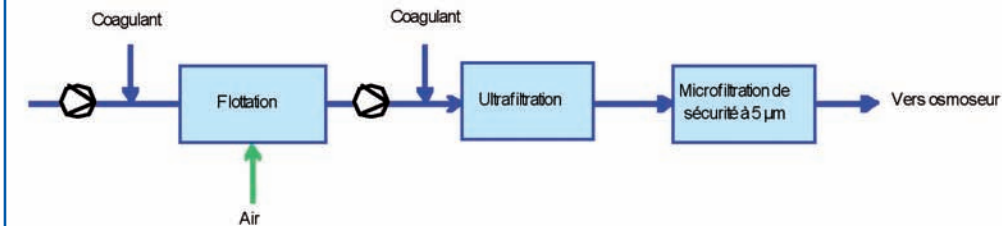


Figure 7: Prétraitements d'eau de mer difficile faisant appel à une ultrafiltration.

l'apport de matières organiques biodégradables constituant un nutriment à ces derniers, ce qui tend à favoriser leur développement à la surface des membranes.

Les eaux d'alimentation provenant de puits côtiers sont en général de très bonne qualité. Il n'en va pas de même pour les eaux prélevées directement en mer, et en particulier pour des eaux de mer chaudes, qui réclament la mise en œuvre de traitement multi-barrières, afin qu'elles présentent des valeurs faibles de turbidité et d'indice de colmatage, à savoir :

- turbidité inférieure à 0,2 NFU, en ciblant 0,15 NFU ;
- indice de colmatage moyen de 2,5, avec des pointes ne dépassant jamais 3 à 4.

Ces conditions permettent au niveau de la conception, de retenir des flux transmembranaires les plus élevés possible (ce qui réduit d'autant la surface membranaire nécessaire), tandis qu'au niveau de l'exploitation ils permettent :

- d'espacer les nettoyages chimiques ;
- de maintenir un perméat de bonne qualité ;
- de limiter les pertes de charge dans les modules, et donc de faire fonctionner le système de récupération de l'énergie du concentrat, d'une manière optimum, et donc d'économiser de l'énergie ;
- d'augmenter la durée de vie des membranes, en ralentissant au maximum l'évolution de leur fouling irréversible.

Le contrôle du biofouling reste toujours le

problème majeur et c'est dans ce sens que les développements se sont orientés pour atteindre des taux d'abattement les plus importants possible pour les micro-organismes et les matières organiques.

Les tendances actuelles consistent en :

- la suppression de la préchloration continue, car elle a pour inconvénient majeur de transformer certaines matières organiques non biodégradables, comme les acides humiques, en matières biodégradables servant alors de nutriment aux micro-organismes. Elle est avantageusement remplacée par des chloration chocs suivies d'une déchloration, par des injections périodiques de biocides spécifiques, ou par une oxydation à l'aide d'un rayonnement UV, afin de limiter la présence de micro-organismes ;

- l'adoption de techniques membranaires de clarification, en particulier de l'ultrafiltration, pour remplacer les étapes de filtration sur matériaux granuleux. Si l'ultrafiltration permet d'obtenir une eau de bonne qualité (turbidité inférieure à 0,1 NFU, indice de colmatage de 1,5 en moyenne), elle ne permet pas d'abattre efficacement la concentration en matières organiques, seules les macromolécules organiques étant retenues. L'ultrafiltration doit donc être complétée par une étape de coagulation.

Les figures 6 et 7 présentent deux exemples de prétraitements pouvant être adoptés pour des eaux de mer chaudes et de mauvaises qualités

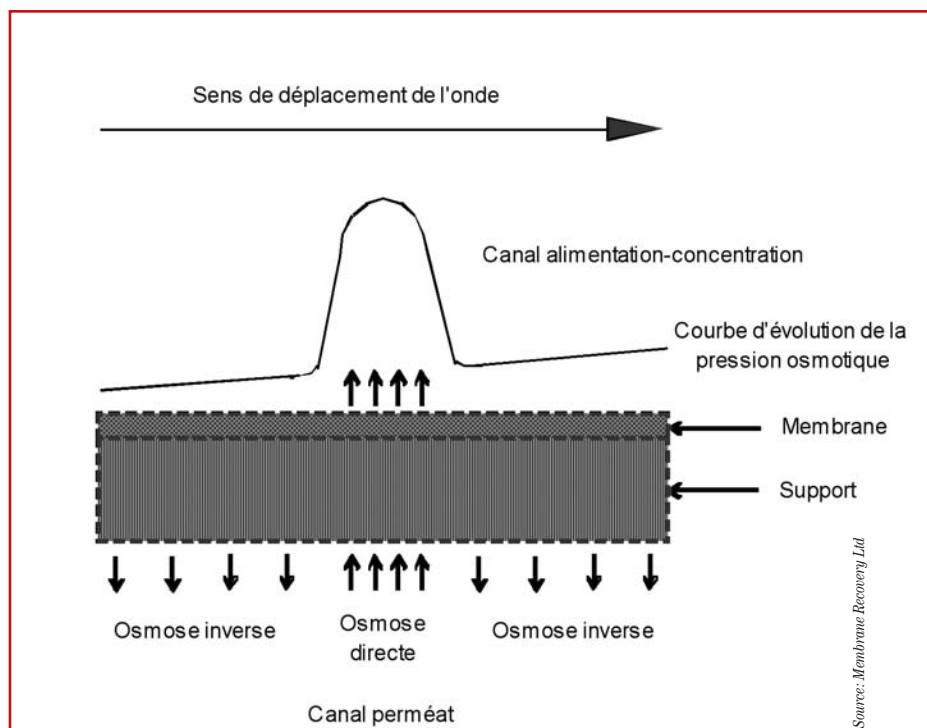
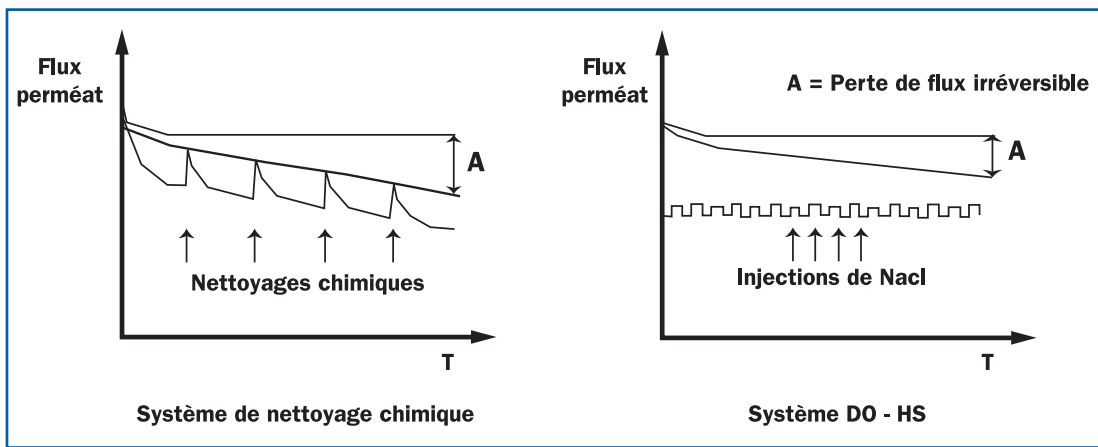


Figure 8: Principe du système de nettoyage utilisant le principe de l'osmose inverse directe par injection d'une solution concentrée du chlorure de sodium.

Les nouvelles tendances au niveau de l'exploitation

Il a été mis en évidence l'effet biocide des chocs osmotiques pour éviter l'envahissement par les micro-organismes des



Source : Membrane Recovery Ltd

Figure 9 : Comparatif de l'évolution du flux de perméat au cours du temps, pour les deux systèmes NEP et DO-HS.

médias filtrants et des membranes. Cet effet s'explique de la façon suivante: le cytoplasme, partie interne des cellules des micro-organismes composée en grande partie d'eau, est entouré par une membrane semi-perméable. Si on augmente la salinité du milieu qui entoure les micro-organismes, il y a passage de l'eau interne des cellules vers le milieu environnant (phénomène de l'osmose directe), ce qui provoque leur assèchement et leur mort. C'est ainsi qu'il est recommandé de laver périodiquement les filtres avec le concentrat sortant des osmoseurs.

Le rinçage des membranes à l'aide de perméat provoque également des chocs osmotiques à effet biocide. Dans ce cas, il y a passage de l'eau douce vers l'intérieur des cellules ce qui modifie la salinité du cytoplasme (phénomène de l'osmose directe), et entraîne la détérioration de la membrane de la cellule.

Un système de nettoyage des membranes utilisant le principe de l'osmose directe, est actuellement en cours de développement par la société Membrane Recovery Ltd (DO - HS System : Direct Osmosis - High Salinity System).

Ce nettoyage s'effectue quotidiennement en cours de production, et permet selon les promoteurs de remplacer efficacement les nettoyages chimiques périodiques.

Ce procédé consiste à injecter, dans le circuit d'alimentation en eau de mer, une solution concentrée de chlorure de sodium pendant un court laps de temps, ce qui provoque une onde d'eau à pression osmotique élevée, se déplaçant dans les canaux alimentation-concentrat des éléments. Au passage de l'onde, le phénomène d'osmose inverse est remplacé par celui d'osmose directe, c'est-à-dire qu'il y a passage de perméat vers la zone d'alimentation-concentration, comme l'in-

dique la figure 8.

Le flux provoqué par l'osmose directe, à contre-courant du sens de la production, permet de détacher les dépôts ayant pu s'accumuler sur les membranes, afin de les entraîner dans le flux du concentrat. Il se produit également un choc osmotique qui assèche les cellules des micro-organismes conduisant à leur mort, comme vu plus haut, ainsi qu'une dissolution des micro-cristaux s'étant développés sur les membranes et sur les espaces.

Ce procédé permet, selon les promoteurs, de maintenir constantes la production du perméat et sa qualité, comme illustré par la figure 9, de limiter les pertes de charge procurant ainsi une économie sur les dépenses énergétiques, et de prolonger la durée de vie des membranes.

Autres tendances

La parfaite maîtrise du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, ainsi que les

d'eau douce produit par osmose inverse se rapproche de celui des usines de dessalement par voie thermique, pour les pays possédant des ressources énergétiques peu coûteuses.

Ainsi au Moyen-Orient, au lieu de mettre en concurrence ces deux procédés de dessalement, il a été réalisé des usines hybrides (osmose inverse - distillation à détente étagée), couplées à des centrales de production d'électricité, comme l'illustre le schéma de la figure 10 donnant l'exemple de l'usine de Fujairah (Émirats Arabes Unis).

L'avantage des usines hybrides est de procurer une grande souplesse d'exploitation au niveau de la production, contrairement aux usines n'utilisant que la distillation, car la production d'eau de ces dernières est directement fonction de la consommation électrique, alors que les demandes de pointe en eau et en énergie ne coïncident que très rarement. Au contraire une usine hybride permet, en cas de faible demande électrique,

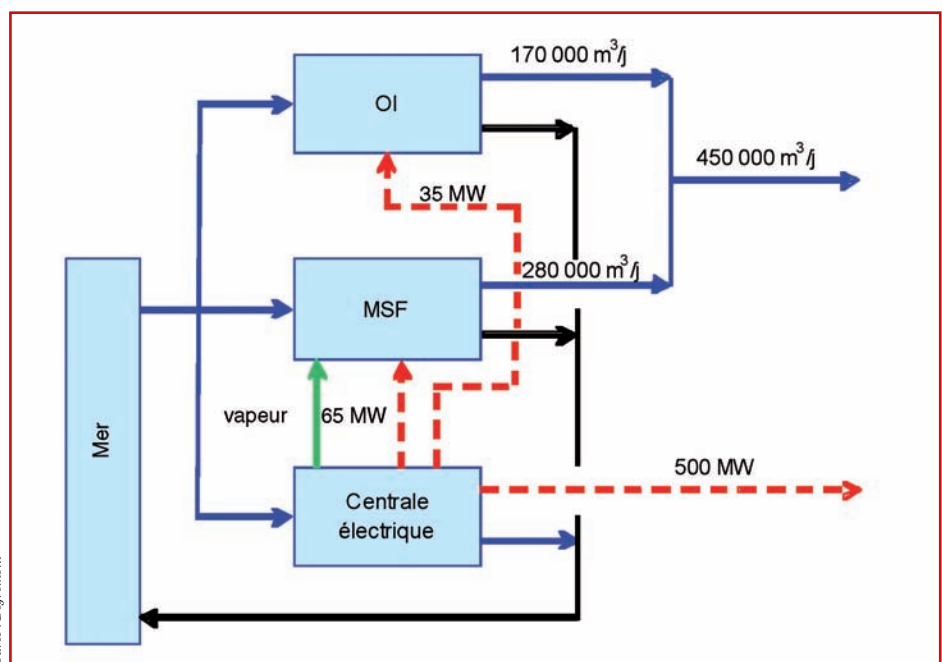


Figure 10 : Exemple d'une usine hybride de dessalement, associant osmose inverse et distillation thermique. Usine de Fujairah (Émirats Arabes Unis).

d'utiliser au maximum la capacité de l'osmose inverse.

Conclusion

Si l'on considère que les rendements des pompes (près de 90 %) et ceux des récupérateurs directs de l'énergie du concentrat (environ 95 %) ont atteint leur valeur maximum, les développements les plus importants à attendre maintenant se situent au niveau des membranes et de leur mise en œuvre, afin d'améliorer leur productivité, la qualité du perméat, et de diminuer la pression nécessaire à leur alimentation, tout en augmentant leur durée de vie et leur résistance aux colmatages de toute nature.

Mais il est aussi nécessaire de faire la synthèse des vingt-cinq dernières années d'expérience, afin de rationaliser les règles de conception et d'exploitation des usines de dessalement par osmose inverse, surtout pour celles de petites et moyennes capacités.

En dehors des développements attendus pour les membranes, des efforts restent à accomplir pour la maîtrise de la qualité de l'eau d'alimentation des membranes, paramètre essentiel pour assurer une exploitation aisée et économique des usines de dessalement.

Mais ne doivent pas être négligés les efforts à développer pour créer des logiciels efficaces d'aide à l'exploitation, permettant de suivre l'évolution réelle des paramètres de productivité et de qualité, quelles que soient les variations des caractéristiques de l'eau de mer, de programmer l'ajout et/ou le remplacement partiel des éléments membranaires afin de conserver la productivité et la capacité...

La mise en place de ces outils doit s'accompagner d'efforts de formation du personnel d'exploitation.

Nous sommes donc entrés dans une période d'optimisation des systèmes, des équipements et de leur exploitation. L'évolution des coûts d'investissement ne se fera que par l'élargissement du marché des usines de dessalement par osmose inverse du fait de l'accroissement de la demande en eau, des situations de pénurie, mais aussi du fait de la compétitivité des procédés du dessalement par osmose inverse, par rapport aux traitements nécessaires à faire subir aux eaux de ressources conventionnelles, et à leur transport. ■