**SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE FILTRATION**

Colloque d'hydrotechnique — 20 et 21 novembre 1985

Transfert de matière et hydrodynamique
dans les procédés de séparation par membranes

**Applications des membranes d'osmose inverse
au traitement de l'eau**

*Applications of inverse osmosis membranes
in the treatment of water*

L. Daniel

Degrémont, Rueil-Malmaison

Le dessalement des eaux saumâtres a été le premier domaine important d'application de l'osmose inverse.

D'abord limités aux petites installations, surtout dans le secteur industriel, les développements, tant au niveau des membranes qu'au niveau des modules et de la connaissance des prétraitements à appliquer, permettent maintenant de couvrir avec succès des domaines variés allant du traitement de l'eau présentant un fort indice d'encrassement tel que la réutilisation d'eau résiduaire, jusqu'à la réalisation de grandes stations d'osmose inverse sur eau de mer.

The desalinization of brackish water has been the first important field as regards the application of inverse osmosis.

Initially restricted to small installations mainly in the industrial sector, both as regards membranes and modules and a knowledge of the pretreatments to be applied, developments now cover a wide range of fields ranging from the cleansing of water with a high coefficient of dirt accumulation, such as the re-use of effluent, to the production of large inverse osmosis stations at sea.

Dans tous les domaines industriels se présentent des étapes de purification d'eau ou de liquides nobles, séparation de mélanges, de concentration de produits valorisables ou d'éléments polluants. Depuis toujours, la réponse à ces problèmes a été thermique ou mécanique : floculation, décantation, filtration, centrifugation, distillation. Ces méthodes éprouvées de longue date, ont démontré l'étendue de leurs possibilités, mais leurs limites qualitatives et quantitatives sont connues : la recherche de puretés plus élevées et de rendement accrus obligent les industriels à rechercher des alternatives.

Les membranes en général, et celles destinées à l'osmose inverse en particulier, peuvent désormais fournir dans la plupart des cas une solution à ces problèmes.

En 20 ans, elles sont sorties du laboratoire pour s'implanter dans pratiquement tous les secteurs industriels. Une autre preuve de leur potentiel : la recherche y est très active, on est vite passé des premières membranes commercialisées, à la durée de vie limitée, à des produits capables de résister aux agressions chimiques et biologiques, en même temps que diversifiés pour s'adapter à des conditions de travail plus sévères, leur permettant de conquérir de nouveaux marchés.

Après un rappel succinct, relatif à la conception d'une installation d'osmose inverse, aux membranes les plus courantes actuellement et à leur configurations, nous passerons en revue quelque unes de leurs nombreuses applications.

1. PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT

Le schéma de base (fig.1) consiste à mettre en série une pompe haute pression et un module : l'eau pure traverse la membrane tandis que le rejet concentré est évacué en continu par l'intermédiaire d'une vanne de détente.

Deux paramètres principaux permettent de suivre le fonctionnement d'une installation

d'osmose inverse :

Une expression liant les débits : la conversion (Y), rapport du débit de perméat (Q_P) sur le débit en alimentation du module (Q_A), suivant l'expression :

$$Y(\%) = 100 \frac{Q_P}{Q_A}$$

son corollaire est le facteur de concentration (FC) qui compare le débit d'alimentation (Q_A) au rejet concentré (Q_R) :

$$FC = \frac{Q_A}{Q_R} \quad \text{ou encore} \quad FC = \frac{100}{100-Y}$$

Ainsi, pour une conversion $Y = 75\%$ on aura $FC = 4$.

Si on suppose que les sels ne passent pas à travers la membrane, ils seront donc concentrés 4 fois.

Le deuxième élément est le passage de sel (PS), indicatif de la perméabilité aux sels de la membrane. Il est égal au rapport entre la salinité du perméat (C_P) sur la salinité de l'eau d'alimentation (C_A) :

$$PS(\%) = 100 \frac{C_P}{C_A}$$

Pour exprimer le même concept, on utilise aussi le terme "rejet de sels" de la membrane, donnant sa capacité à retenir ceux-ci. Il est exprimé par la différence à 100 du passage de sel.

$$\text{Rejet de sels}(\%) = 100 - PS$$

2. STRUCTURE D'UN POSTE D'OSMOSE INVERSE

Dans la pratique, une unité d'osmose inverse consiste en une juxtaposition de modules élémentaires selon une géométrie déterminée.

Ceci conduit à une grande facilité d'extrapolation et d'adaptation des unités à la diversité des traitements.

Le schéma de montage le plus simple est un montage en "parallèle". Tous les modules travaillent dans les mêmes conditions de pression et de conversion. Ce système (fig. n°2) est utilisé pour la plupart des unités de faible capacité. Deux manomètres situés en amont et en aval des modules permettent de contrôler en permanence la perte de charge à l'intérieur du système. Deux débitmètres (M), sur l'eau traitée et sur le rejet, visualisent la conversion qui est réglée par une vanne de régulation.

On peut aussi utiliser, pour augmenter le taux de conversion, une disposition des modules en série (fig.3) : le rejet du 1er étage alimente les modules du second étage. Une pompe intermédiaire n'est pas nécessaire puisque la pression disponible au rejet du premier étage est très peu différente de la pression d'alimentation du second. Un tel système, habituellement appelé montage en "série rejet", atteint aisément des conversions de 70 à 90% (série de 2 ou 3 étages).

Pour la production d'eaux de haute qualité, on peut utiliser un traitement en deux étapes : "série production". La production du 1er étage est reprise par un groupe de pompage et traitée une nouvelle fois. Le rejet de la seconde étape, peu concentré, est recyclé en tête de

l'installation, diluant quelque peu, de ce fait, l'eau d'alimentation.

3. FACTEURS INFLUENCANT LES PERFORMANCES

Les deux paramètres-clés, que sont conversion et passage de sel, liés à la grande diversité des eaux susceptibles d'être traitées par osmose inverse, impliquent des contraintes nombreuses et variées dans les domaines physiques, chimiques et biologiques.

Parmi les facteurs physiques, on peut citer tout d'abord :

- de par sa nature organique, la membrane est très sensible à la température : quand elle augmente, le débit s'accroît, mais la perte de débit, liée au temps de fonctionnement (compaction) devient prépondérante. Dans la pratique, la température maximale acceptable se situe entre 40 et 50 °C.
- La connaissance de la teneur en matières en suspension, qu'elle soit d'origine minérale ou organique, est prépondérante pour le choix d'une osmose inverse. Les risques de dépôts sur les membranes, entraînant la perte des performances obligent soit à éliminer au préalable ces colloïdes par un prétraitement adapté (par exemple : floculation-décantation suivi d'une filtration), ou bien choisir une géométrie limitant les dépôts.

La précipitation des sels minéraux est un facteur chimique important. L'osmose inverse, en tant que procédé de séparation et de concentration, permet aux sels peu solubles, tels que les sulfates de calcium, barium et strontium, fluorure de calcium, silice, d'atteindre leur produit de solubilité et de colmater le module. Dans ce cas, un prétraitement doit donc être mis en oeuvre pour réduire la concentration de l'un des ions constituant le sel pouvant précipiter, ou de le sequestrer. A ce titre, on utilisera l'un des procédés suivants : vaccination acide, décarbonatation ou adoucissement chimique, échange d'ion par résine, désiliciage, déferrisation.

Le pH, très variable, surtout dans les traitements destinés aux industries chimiques, peut, dans les deux extrêmes, provoquer des hydrolyses en coupant les chaînes de polymères constituant les membranes. Le domaine acceptable, variable suivant les membranes, est malgré tout étendu : de pH 2 à 11.

Les facteurs microbiologiques peuvent, dans certaines chaînes de traitement, revêtir une grande importance, soit par l'action directe des bactéries sur les membranes, soit par l'effet de colmatage que leur croissance occasionne. Le contrôle de ces développements s'opère à l'aide de nombreux procédés biostatiques, parmi lesquels on trouve principalement: chlore, ozone, ultra-violets.

4. LES QUALITES D'UNE MEMBRANE

Les éléments trop contraignants pour l'osmose devront donc être réglés préalablement par prétraitement ; mais bien évidemment, les membranes doivent posséder un certain nombre de qualités propres pour permettre leur application à l'industrie :

- . un rejet de sel élevé et un flux de perméat important, et cela pour une pression d'opération la plus faible possible ;
- . une bonne résistance à la compaction au cours du temps ;
- . une présentation aussi dense que possible (surface membranaire par rapport au volume du module), afin de réduire l'encombrement et les coûts liés à l'enveloppe qui doit résister aux hautes pressions ;
- . une compatibilité chimique avec les fluides à traiter ;
- . une bonne stabilité mécanique et chimique, afin de résister aux contraintes des prétraitements, variations de pH et de température, nettoyages chimiques et interventions de maintenance.

5. MEMBRANES ET CONFIGURATIONS

Ces spécifications, nombreuses et variées, ont donc obligé les concepteurs de modules à développer, non seulement des membranes performantes, mais aussi à étudier les différentes configurations adaptées, afin de répondre le mieux possible aux différentes contraintes posées par les applications industrielles.

Les membranes d'osmose sont dites "asymétriques" car la face en contact avec l'eau à dessaler est dense et extrêmement fine. Elle est appelée "couche active" et constitue la barrière aux sels, tout en présentant une certaine perméabilité à l'eau. La partie la

plus épaisse de la membrane ne constitue que la "couche support" perméable, n'assurant que la résistance mécanique.

Actuellement, les plus répandues sont :

- . les membranes en acétate de cellulose (mélange de mono- di- et triacétate) : elles peuvent être dégradées biologiquement, mais en revanche acceptent la présence de chlore. Elles travaillent dans une gamme de pH relativement restreinte, de 4 à 7 ;
- . les membranes en polyamide aromatique : insensibles à l'hydrolyse bactérienne, mais le contact avec les oxydants doit être évité ; elles acceptent des pH de 4 à 11 ;
- . et plus récemment, les composites, caractérisées par leur couche active très mince (0,04 à 0,1 μm) permettant des flux élevés ; la gamme de pH acceptés est large : de 2 à 11.

Les configurations se répartissent en 4 principaux groupes :

- Les membranes planes (fig.4) sont destinées au traitement de solution à viscosité moyenne ; le volume mort, peu important qu'elles présentent, les expose par contre à de grandes pertes de charge et à des risques de colmatage.

Fig.4 - Membranes planes.

- Les membranes à enroulement spirale (fig.5), autour du tube collecteur de perméat. En opération, l'eau à traiter circule longitu-

dinalement et le perméat est dirigé vers le collecteur central. Plusieurs éléments peuvent ainsi être placés en série dans un même cylindre de pression

Les membranes fibres creuses (fig. 6a et 6b), caractérisées par leur faible diamètre (environ 40 μm intérieur et 100 μm extérieur).

Leur compacité est donc remarquable, par exemple : 160 m² pour 800 000 fibres dans un module de 10 cm de diamètre et de 1 m de longueur.

Les fibres d'osmose, disposées longitudinalement, sont balayées par l'eau à traiter circulant du centre vers la périphérie du module.

Le perméat, circulant à l'intérieur des fibres, est collecté à une extrémité et le concentrat, rejeté à l'autre.

A l'opposé des avantages liés à sa capacité, cette configuration accroît la sensibilité aux accumulations de dépôts de toutes origines.

- Les membranes tubulaires (fig. 7) sont fixées sur la face interne d'un cylindre support poreux, lui-même à l'intérieur d'un support rigide percé de trous, permettant de résister à la pression de fonctionnement.

En opération, l'eau à traiter circule à l'intérieur du tube, le perméat étant récupéré à l'extérieur.

Les grandes vitesses permises destinent cette configuration au traitement d'effluents chargés en matières en suspension et à viscosité élevée.

6. ACTIONS D'EPURATION DES MEMBRANES

Les applications de l'osmose inverse vont donc découler des qualités des membranes dans les différents domaines d'épuration.

- Epuration physique

L'osmose inverse permet de retenir tous les éléments physiques, colloïdaux d'une taille supérieure ou égale à 0,005 micron, soit 40 fois mieux que les plus fins moyens de fil-

tration actuellement utilisables.

- Epuration chimique

Le rejet de sel est l'un des atouts majeurs de cette technique. Bien que dépendant des ions considérés et des conditions d'opération, l'osmose inverse permet d'obtenir, dans le perméat, une salinité entre 10 et 100 fois plus faible que celle l'eau alimentant le module.

En règle générale, plus la valence de l'ion sera faible, plus réduit sera le passage de sel. D'autres comme les bicarbonates et le fluor voient leur passage lié au pH. Les gaz dissous, par contre, passent entièrement à travers la membrane. On aura ainsi, par exemple, pour une membrane type moyenne pression, travaillant à 30 bars et une membrane haute pression à 55 bars :

Passage de sels %

	Membrane moyenne pression	Membrane haute pression
Sodium Na^+	10	1,5
Chlorure Cl^-	10	1,5
Calcium Ca^{2+}	4	0,6
Sulfates SO_4^{2-}	4	0,6
Phosphates PO_4^{3-}	2	0,3
Dioxyde de carbone		
CO_2	100	100

- Epuration organique

L'efficacité des membranes à l'égard des produits organiques dissous est très variable.

Les hydrates de carbone et les glycols sont en général bien rejetés quand leur masse moléculaire est supérieure à 100.

Fig. 8 - Effet du poids moléculaire sur le rejet des hydrates de carbonates et de glycols.

Pour les acides organiques et leurs sels sodiques, le facteur indicatif le plus important est le rapport entre forme acide et forme saline, dans la mesure où cette dernière est mieux rejetée par la membrane. La connaissance du pH et du pK (constante de dissociation) sont donc déterminants.

Pour les alcools non ramifiés, les rejets augmentent avec la masse moléculaire pour plafonner vers 70% à partir d'une masse de 70. A partir d'une masse de 100, la solubilité devient trop faible pour un traitement par osmose.

L'effet stérique (ramification) des alcools accroît le taux de rejet, pour une même masse moléculaire.

	Masse moléculaire	Concentration en aliment	Rejet (%)
n-propanol	60	500-2000	62
iso-propanol	60	500-2000	75

- Epuration bactériologique

Le traitement par osmose inverse est un moyen efficace d'éliminer, à plus de 99% dans le perméat, les bactéries et virus, quelles que soient la conversion et la pression.

7. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les applications de l'osmose inverse à l'industrie sont variées et continuent à se diversifier. Nous allons en voir quelques exemples, dans un panorama, bien sûr non exhaustif.

Les utilisateurs chercheront soit à concentrer des poroduits valorisables et utiliseront pour cela la fraction rejet des modules, soit à éliminer des polluants ou des sels en récupérant le perméat.

7.1.- Les industries alimentaires utilisent en général les membranes tubulaires ou planes, car elles recherchent une déshydratation partielle de produits colmatants.

Le concentré de tomates est obtenu par élimination d'une partie de l'eau contenue dans la pulpe. Dans le traitement classique, on utilise un évaporateur permettant de passer de 5° Brix (245 g/l) à 30° Brix (280 g/l).

L'ajout d'une osmose inverse tubulaire en tête de l'évaporateur permet d'alimenter celui-ci à 10° Brix (100 g/l) permettant un gain d'énergie et le doublement de la capacité de l'évaporateur.

Le perméat produit une solution présentant un Brix de 0 (environ 1 g/l de matière sèche), donc une perte de matière négligeable.

Compte-tenu de la viscosité élevée du produit à traiter, on utilise un système de boucle renvoyant une partie du concentrat en alimentation, ce qui permet l'ajustement de conversion basse et de vitesse de circulation élevée (fig.11).

Pour atteindre la concentration finale, plusieurs boucles similaires sont placées en série et alimentées par une fraction du concentrat précédent.

Suivant le même schéma, les jus de fruit et de légumes peuvent être concentrés avec une perte minime d'arôme. Les extraits de café et thé pour les préparations de produits instantanés sont concentrés jusqu'à 40 %.

Le moût de raisin, destiné à la vinification trouve là un moyen d'augmenter légalement la quantité de sucres, en enlevant de l'eau pure au moût avant fermentation. Potassium et tanins sont conservés par le traitement ; par contre, environ 10% de l'acide malique est éliminé, ce qui permet de réduire l'acidité et améliorer la qualité du vin obtenu.

Les sous-produits de la fabrication des produits laitiers et plus particulièrement le lacto-sérum et ses dérivés sont extrêmement riches en protéines.

Les protéines du lait sont sensibles à l'hydrolyse enzymatique et par consé-

quent décomposables en acides aminés assimilables par l'organisme humain.

La revalorisation des lacto-sérums est liée à la concentration et au dessalement de ce produit, en vue de la récupération de protéines pures.

Le concentré peut être utilisé directement pour l'alimentation animale, ou mélangé au lait écrémé.

La concentration du lacto-sérum à la fromagerie, avant transport vers une centrale de séchage, représente un moyen efficace de réduire les coûts de stockage et de transport.

Le lait écrémé peut être concentré avant fabrication de yaourt, fromages blancs et crèmes glacées.

- 7.2. L'osmose inverse, appliquée aux traitements de surface (fig.12), permet de récupérer les ions métalliques complexés ou non. Ils sont en effet très bien retenus par les membranes d'osmose, avec des pourcentages de rejets de :

. CU.....99%
 . CrO₄.....99%
 . Zn.....95 à 99%
 . CrO₇.....98%
 . Ni.....95 à 99%

Les installations de nickelage, par exemple, comportent outre les bains de traitement proprement dits, des séries de bains de rinçage où sont lavées les pièces après revêtement.

L'entraînement hors des bains de nickelage est inévitable ; il y a donc pollution des eaux de rinçage.

Cette eau peut être traitée en continu par osmose inverse pour que l'apport des sels de métal dans le bassin de rinçage, à partir du bassin de traitement, soit compensé et que la concentration

dans le rinçage traité reste constante.

L'osmoseur permet, d'une part, d'épurer en continu le premier bac de rinçage récupérant ainsi de 90 à 97% du nickel qui est renvoyé au bain de traitement et, d'autre part, de produire une eau de qualité suffisante pour être renvoyée au premier rinçage.

Le facteur de concentration doit être suffisamment élevé pour que le concentrat n'apporte pas dans le bain de nickelage plus d'eau qu'il n'en est parti par évaporation. Des exemples industriels précis montrent qu'il faut obtenir une concentration par un facteur allant de 10 à 25. Ceci est possible par la mise en série de plusieurs modules.

Dans un atelier traitant des pièces automobiles et comportant un bain de métallisation de 13 m³, les pertes par évaporation étant de 40 l/h, alors que les pertes d'entraînement sont limitées à 6 l/h, on peut obtenir les résultats ci-après :

	Ni mg/l	
Bain mort	320	
Bac de recyclage	1700	
Eau épurée	18	
Concentrat	8000	

Dans ce cas, pour un retour vers le bac de 3x40=320 g de nickel/h, les pertes par entraînement, à partir du bain mort, sont limitées à 0,32x6=1,9 g/h, soit moins de 1%.

L'énergie consommée est d'environ 2 kW/h.

Une telle installation peut donc, suivant les cours du métal, être amortie en une à trois années.

7.3.- Les eaux résiduaires d'origines très diverses pourront être traitées par osmose inverse, permettant de limiter la quantité des rejets en concentrant la fraction polluée, mais aussi de recycler le perméat afin d'économiser l'eau d'appoint.

Les industries chimiques peuvent traiter leurs effluents, après un prétraitement adapté, généralement du type aération, coagulation-flottation (ou décantation), suivi d'une filtration rapide sur sable (rétention des colloïdes) et d'un passage sur charbon actif s'il y a des hydrocarbures. Une microfiltration, pour la protection des membranes complétant le prétraitement.

Le perméat récupéré sur un ou plusieurs étages d'osmose inverse peut être réutilisé pour l'alimentation des chaudières, par exemple (après déminéralisation par échange d'ions).

La principale difficulté du traitement des effluents industriels par osmose inverse tient, pour une installation donnée, à l'irrégularité du traitement : la grande diversité et les concentrations très variables des produits rejetés obligent souvent à des essais de faisabilité afin de tester une éventuelle nocivité vis-à-vis des membranes.

Les industries agricoles et alimentaires trouvent là un moyen de limiter leurs rejets et de recycler une partie des eaux de lavage, grâce à une réduction des demandes chimiques et biologiques en oxygène.

L'osmose inverse peut aussi s'insérer à la suite d'un schéma classique de traitement d'eaux résiduaires urbaines et permettre la réutilisation de cette source permanente à proximité d'un grand nombre d'utilisateurs potentiels, sous forme d'eau d'appoint pour l'industrie, l'agriculture ou même pour les zones arides et après un traitement adapté, redistribué comme eau potable.

C'est aussi un moyen, comme dans le sud-ouest des Etats-Unis, d'éviter l'intrusion d'eau de mer dans les nappes d'eau douce fournissant l'eau potable et en même temps recycler cette eau résiduaire dépolluée.

7.4.- L'industrie des semi-conducteurs nécessite depuis longtemps de l'eau ultrapure chimiquement, physiquement et biologiquement. Cependant, l'accroissement très rapide des capacités des mémoires (on est parti de 1 K-bit chips en 1970 à 256 K-bits chips actuellement et le 1 M.bit chips est en cours de réalisation) a provoqué des exigences de plus en plus draconiennes pour la qualité de l'eau dite "ultrapure", utilisée essentiellement pour le rinçage des plaques de silicium. Le dépôt, sur ces plaques, de toute trace de matière, perturbera le fonctionnement des microprocesseurs : ainsi les particules créent des courts circuits, les matières organiques sont adsorbées à la surface, les ions vont diffuser dans le silicium.

L'évolution des garanties généralement demandées apparaît nettement dans le tableau page suivante :

Afin de satisfaire une telle demande, l'osmose inverse sera insérée dans une chaîne de traitement particulièrement poussée, du type ci-dessous (fig.13), qui pourra bien sûr être modifiée pour s'adapter aux garanties requises et à la qualité de l'eau à traiter.

Le traitement sera divisé en deux parties principales :

- le traitement de l'appoint permettant, à partir de l'eau brute, d'obtenir une eau ultrapure proche des garanties, avec principalement :

- un dégazage atmosphérique (après acidification) permettant de soulager la chaîne de déminéralisation en aval, en éliminant le CO_2 . Cet appareil a un inconvénient, c'est d'introduire une pollution supplémentaire (poussières et bactéries).

	en 1980	Actuellement
Résistivité à 25°C	18 M ohms x cm	18 M ohms x cm
Silice (SiO ₂)	< 10 ppb	< 5 ppb
Bactéries	< 1000 colonies/litre	10 colonies/litre
Sodium (Na)	< 5 ppb	1 ppb
Chlorure (Cl), Potassium (K)	-	< 2 ppb
Cuivre (Cu), Zinc (Zn)	-	< 1 ppb
Salinité totale	-	< 10 ppb
Carbone organique total (TOC)	< 500 ppb	< 50 ppb
Particules > 1 u	1000/litre	500/litre
Particules 0,5 à 1 u	-	1000/litre

. L'osmose inverse, élimine plus de 90 à 95% de la salinité et soulage les échangeurs d'ions en aval, mais surtout arrête la pollution bactériologique.

. Les échangeurs d'ions : suivant l'importance de la salinité résiduelle, il y aura une chaîne primaire, suivie d'un lit mélangé, ou directement un lit mélangé.

. Une microfiltration qui bloque les fines de résines échangeuses d'ions (attrition des résines).

. Une ozone, éventuellement, qui permet d'éviter les développements bactériens dans le bac de stockage.

- Le traitement de la boucle de distribution, afin de conserver la qualité requise.

. Stockage sous azote pour éviter la redissolution du CO₂ (une eau ultrapure à 18 M ohmsxcm, exposée à l'air libre passe en effet à 2 M ohms en moins de 15 secondes, par suite de la dissolution du gaz carbonique de l'air).

. Les ultra-violets (UV), en début de boucle, assurent la stérilisation et détruisent le résiduel d'ozone.

. Le lit mélangé élimine les ions ayant échappé au traitement de l'appoint, ainsi que le CO₂ résultant de la destruction des matières organiques par l'ozone et les U.V.

. Une microfiltration à 5 microns, afin de retenir les fines du lit mélangé.

. UV en stérilisation.

. Puis, de nouveau, une osmose inverse afin d'éliminer les matières bactériennes et virales, ainsi que les microparticules.

Actuellement, il commence à être question d'exigences concernant les teneurs maximales en gaz dissous, tels que azote, oxygène, gaz carbonique, susceptible de laisser des traces par les bulles formées sur les plaques de semi-conducteurs, ce qui nécessitera un recours aux procédés de dégazage sous vide.

Mais la préoccupation principale reste l'obtention de très basses valeurs en matières organiques (TOC) qui ont tendance à remonter, même dans la boucle d'utilisation, à cause du lessivage des tuyauteries (obligeant à utiliser des matières telles que Téflon ou PVDF), au lessivage des résines échangeuses d'ions, bactéries lysées, pollutions amenées par les réactifs chimiques de régénération, ce qui impose pratiquement l'osmose inverse comme filtration finale.

7.5.- Les applications à la production d'eau potable constituent la mise en oeuvre la plus spectaculaire de l'osmose inverse par la taille des installations et les débits produits.

L'objet du traitement est de ramener à des niveaux de salinité acceptables pour la consommation humaine (environ 500 mg/l de salinité) des eaux saumâtres de 1 à 20 g/l ou même des eaux de mer atteignant des valeurs de 42 g/l, comme c'est le cas pour la Mer Rouge ou le Golfe Persique.

Dans le cas des eaux saumâtres, les installations sont toujours multi-étages, mais les prétraitements sont très variables, allant d'une simple microfiltration de sécurité jusqu'à des formes élaborées, indispensables quand les pertes d'eau doivent être limitées au maximum, comme dans le cas de la ville de Riyadh en Arabie Saoudite.

Les seules ressources de cette région sont constituées par des nappes profondes, chaudes et saumâtres (salinité de l'ordre de 1500 mg/l).

La rareté de l'eau et les difficultés d'évacuation des rejets concentrés ont conduit à imposer au système un minimum de 90% de récupération d'eau.

Cette installation (fig.14) capable de produire 2530 M3/h est alimentée par 16 puits extrayant l'eau d'une nappe située à 1400 mètres en-dessous du niveau du sol.

L'eau délivrée à l'installation a une température de 60°C et de composition suivante :

- salinité totale : env. 1,5 g/l
- TH_2 : 70 °F
- Ca^{2+} : 180 mg/l
- HCO_3^- : 200 mg/l
- Cl^- : 300 mg/l
- SO_4^{2-} : 500 mg/l
- SiO_2 : 25 mg/l
- Fe : 2,5 mg/l

Compte-tenu de cette salinité relativement faible de l'eau brute, celle de l'eau osmosée sera seulement de l'ordre de 100 mg/l ; aussi, ne dessale-t-on qu'une partie de l'eau qui est ensuite reminéralisée à 500 mg/l par mélange à l'eau brute.

La conversion de 90% demandée signifie que les sels de l'eau brute seront concentrés 10 fois (FC=10). Le carbonate de calcium, le fer, la silice et les silicates mixtes précipiteraient dans les modules si un prétraitement n'était pas mis en oeuvre.

Celui-ci consiste donc essentiellement en un passage sur des aéroréfrigérants qui ramènent la température à 35°C et permettent la précipitation du fer sous forme d'hydroxyde, suivi de traitements de désiliciage, décarbonatation et adoucissement réalisés simultanément dans les décanteurs à lit de boue.

L'eau est acidifiée et ensuite filtrée en deux étages, additionnée d'hexameta-phosphate afin de retarder les précipitations de carbonate et de sulfate de calcium, puis acidifiée de nouveau avant d'être reprise par des pompes haute pression délivrant à 28 bars vers les modules d'osmose inverse, disposés en trois étages série-rejet.

L'eau produite par osmose inverse, qui contient environ 100 mg/l de sel, est alors mélangée à la fraction d'eau brute non traitée, afin d'obtenir une eau potable, à 500 mg/l environ, qui est désinfectée par chloration avant stockage et distribution.

QUELQUES MARCHES D'APPLICATION DES MEMBRANES D'OSMOSE INVERSE

Type d'industrie	Secteur industriel applications	Nature des solutions traitées	Produits récupérés
Potabilisation		Eau saumâtre, eau de mer	Eau potable
Pharmacie Hopitaux Cosmétique		Eau contenant sels et micro-organismes	Eau déminéralisée Eau apyrogène Alimentation de distillateur préparant l'eau pour injection Préparation de l'eau de dialyse.
Electronique	Fabrication de composant	Eau contenant sels, micro-organismes, et particules	Eau ultrapure (rinçage de composants)
Industries agricoles et alimentaires	Distilleries	Résidus de distillerie	Produits destinés à l'alimentation animale, Eau de chaudière
	Lait,	Lactosérum, lait	Lactose, lait concentré
	Abattoirs, conserveries de viande,	Effluents divers	Protéines, saumures
	Para-agricole	Jus de tomate, pomme, raisin, pruneaux, ananas, jus sucrés, jus de rafles de maïs	Jus concentrés Jus sucrés
Mécanique	Traitements de surface	Eaux de rinçage	Métaux, eaux de rinçage
	Peinture d'électrophorèse	Bains, eau de rinçage	Peinture, pigments, vernis, résine, eau d'appoint
Papeteries		Effluents divers	Glucides, résines
Chimie	Acide acétique	Effluents de fabrication	Acide acétique
	Sulfate de sodium	Effluents divers	Osmose inverse, suivie d'une électrodialyse : concentration puis conversion en soude et acide sulfurique
	Divers	Effluents riches en sels	NaCl, Na ₂ SO ₄ , NaNO ₃ , NH ₄ NO ₃
		Acide borique	Concentration d'acide borique
Photographie		Eau de rinçage	FeCN, thiosulfate, sels d'argent
Mines		Effluents acides de mines	Métaux, sels, eau
Divers	Régulation hygrométrique	Eau contenant sels et particules	Eau d'humidification déminéralisées et sans particules
	Tours de refroidissement	Purges	Eau d'appoint
	Traitements biologiques par lagunage	Effluents de lagunage	Protéines, glucides
	Eaux résiduaires industrielles	Effluents divers	Eau d'appoint
	Eaux résiduaires	Effluent dépollué	Eau d'appoint, à usage agricole, pour injection en nappe, eau potable.

Il faut bien se souvenir du contexte de cette installation. En effet, si, disposant de grandes quantités de la même eau brute, on avait décidé de limiter à 70% la conversion ($FC=3,3$) de l'installation, ce prétraitement se serait résumé à un refroidissement, une floculation sur filtre et une acidification, ce qui représente moins du tiers de l'investissement et de la surface nécessaire pour le prétraitement. Les coûts d'exploitation seraient eux aussi réduits dans la même proportion.

CONCLUSIONS

Cette exposé montre l'évolution récente et spectaculaire du marché de l'osmose inverse. Cette évolution continuera grâce à l'amélioration des connaissances sur les phénomènes mis en jeu, ce qui permettra la mise au point de membranes couvrant des domaines d'application encore plus étendus, grâce à l'augmentation de la perméabilité à l'eau, la diminution du passage de sel et de matière organique, une température d'utilisation supérieure à 50 °C. Mais aussi des performances accrues des membranes dans le domaine des basses pressions (moins de 17 bar) permettant d'importantes économies d'énergie.

Discussion

Président : P. SCHAEGIS

M. Le Président. — Je remercie vivement M. DANIEL pour son exposé fort documenté et aussi pour avoir respecté son temps de parole. Avez-vous des questions à lui poser ?

M. NEEL. — Quel est le volume d'eau produit par jour par osmose inverse et dans ce volume quelle est la part du dessalement et celle des autres applications que vous avez citées ?

M. DANIEL. — Il est difficile d'avoir une idée précise de la situation, mais on peut estimer que la production mondiale d'eau par osmose inverse se situe dans l'ordre des 2 millions de m³ par jour, dont certainement plus de 95 % proviennent du dessalement.

Les applications au niveau des procédés industriels représentent des traitements particuliers et correspondent à des volumes beaucoup plus faibles. Une application qui va se développer concerne le traitement des eaux résiduaires urbaines en vue de leur réutilisation partielle.

M. NEEL. — Une autre question qui concerne les espaceurs dans les modules à enroulement spirale. Quel est l'ordre de grandeur du maillage des espaceurs aval ? Est-ce toujours des toiles ? N'y a-t-il pas d'autres configurations qui puissent intervenir ?

M. DANIEL. — L'espaceur côté « alimentation » est un maillage plastique étiré dont je ne connais pas exactement les dimensions. L'épaisseur est peut-être de l'ordre du quart ou du demi-millimètre. L'espaceur « production », côté perméat, peut être inférieur au quart de millimètre.

M. NEEL. — Le milieu poreux de l'espaceur aval doit quand même être un milieu un peu spécial. Est-ce qu'on utilise toujours

le même composant ou bien existe-t-il plusieurs types d'espaceurs ? Peut-être n'utilisez-vous pas ce type de montage ?

M. DANIEL. — Les espaceurs qui drainent la production du module vers le collecteur central sont en général constitués d'une structure tissée, en polyester par exemple, qui possède une grande perméabilité et une bonne rigidité pour maintenir la membrane.

Le maillage est fin (quelques dixièmes de millimètres) et permet d'éviter l'écrasement dû à la pression d'alimentation (quelques dizaines de bars).

M. AUDINOS. — Je peux donner une précision à M. NEEL en ce qui concerne l'intercalaire qui sert de drain. C'est habituellement un non-tissé qui peut être fourni par différents fabricants.

M. Le Président. — Je pense que ce qui préoccupe M. NEEL c'est que l'intercalaire qui sert de drain doit être perméable dans toutes les directions (perpendiculairement et longitudinalement). La membrane est en effet un sac et le perméat doit pouvoir pénétrer jusqu'au fond de ce sac vers le collecteur central autour duquel est enroulée la spirale.

M. VAN DEN BROEK. — L'eau ultra-pure est un liquide de grand intérêt pour les électriciens car c'est un diélectrique et un fluide caloporteur de premier ordre. Les électriciens utilisent l'eau pure en faibles quantités (usage en circuit fermé). Peut-on envisager le stockage ou l'achat à un producteur centralisé ?

M. DANIEL. — Non, car l'eau ultra-pure a une tendance extrêmement importante à la redissolution d'éléments extérieurs. Certains matériaux sont d'ailleurs interdits dans les installations d'eau ultra-pure, par exemple le P.V.C. qui provoque des relargages très importants. Lors du stockage, il y a également des risques de dissolution de gaz carbonique et de développements bactériens.

M. AUDINOS. — Pourriez-vous préciser l'ordre de grandeur des vitesses de circulation dans le circuit d'alimentation pour les divers types de modules et le régime hydrodynamique correspondant ?

M. DANIEL. — Pour les modules spiraux, la vitesse d'écoulement du fluide à traiter est de l'ordre de 10 à 20 cm/s.

Dans les modules type fibres creuses, l'écoulement se réalise du centre vers la périphérie, avec des vitesses de 1 cm/s environ dans les fibres proches du centre et de 0,2 cm/s environ dans les fibres situées à la périphérie.

Dans les modules tubulaires, la vitesse est de l'ordre de 1 à 3 m/s.

Le régime d'écoulement doit obligatoirement être turbulent pour limiter la polarisation (c'est-à-dire l'accumulation du sel au niveau de la paroi) et la baisse de flux qui peut en résulter.

M. AUDINOS. — Est-ce que le régime hydrodynamique est le même dans les tubes et dans les capillaires ?

M. DANIEL. — Non certainement ! Mais je ne suis pas assez hydraulicien pour vous répondre de façon plus précise.

M. AUDINOS. — Quelle est la nature chimique des membranes citées en exemple de séparation de composés organiques ?

M. DANIEL. — Les exemples cités concernent surtout les membranes polyamides. La sélectivité des membranes est variable suivant le type de traitement recherché et leur choix est fonction de l'usage que l'on veut en faire.

M. AUDINOS. — Dans le cas de la concentration des moûts de raisin en vue de la vinification n'y a-t-il pas risque de précipitations de tanin et de tartrate de potassium ?

M. DANIEL. — Les tanins sont en faible concentration et ne posent en général pas de problème.

En ce qui concerne les tartrates, le moût est préalablement refroidi, le tartrate de potassium est donc précipité avant l'étape d'osmose inverse.

M. Le Président. — L'intervenant connaît la réponse : il sait qu'il y a précipitation !