

10.035  
Organisation pour la Coopération  
et le Développement  
Haut Commissariat  
Centre de Documentation  
Saint-Louis  
2001



RECHERCHE SUR LA

**POTABILISATION DES EAUX DE BOISSON  
HYPER FLUOREES DU SENEGAL PAR  
TECHNIQUES MEMBRANAIRES :  
«nanofiltration»**

*présenté par*

**Monsieur Courfia Kéba DIAWARA**  
*Enseignant-Chercheur à la Faculté des Sciences et Techniques*  
*Université Cheikh Anta DIOP DAKAR-SENEGAL*  
*e-mail: courfia@ucad.sn*

# POTABILISATION DES EAUX DE BOISSON HYPER FLUOREES DU SENEGAL PAR TECHNIQUES MEMBRANAIRES : nanofiltration

**Courfia Kéba DIAWARA**

Laboratoire de Chimie Analytique et Minérale. Faculté des Sciences et techniques - UCAD SENEGAL  
Tel: (221) 825 02 02 Fax: (221) 824 63 18 e-mail: courfia@ucad.sn

## RESUME:

La première expression clinique chez l'homme de la toxicité du fluor consommé de façon chronique est la fluorose dentaire.

La nanofiltration, en tant que technique de membrane particulièrement étudiée depuis peu d'années et située à la fois dans les domaines de l'ultrafiltration et de l'osmose inverse, est le siège de deux phénomènes concomitants ayant permis à partir de solutions synthétiques d'interpréter les résultats expérimentaux suivants : d'une part 56% de rétention de NaI, 66% de NaCl et 96% de NaF ; d'autre part 72% de rétention de LiCl et 93% de LiF.

Les eaux saumâtres présentent des compositions salines beaucoup plus variables et généralement beaucoup moins concentrées que les eaux de mer. Ce qui implique qu'une étude préalable est indispensable pour définir les conditions exactes de fonctionnement d'une installation de traitement par membranes permettant d'optimiser la rentabilité du flux de perméat ( $J_p$  en  $l.h^{-1}$ ) par rapport à la qualité d'eau désirée.

En maîtrisant les paramètres du mécanisme de transfert en nanofiltration, il est possible de traiter une eau de boisson hyperfluorée dont la consommation représente un véritable problème de santé publique (cas du Sénégal).

La nanofiltration, à basse pression, a permis d'obtenir une bonne sélectivité de rétention vis à vis des ions fluorures. On obtient une déminéralisation partielle avec élimination majoritaire des fluorures. L'eau produite est directement potable et microbiologiquement pure.

# POTABILISATION DES EAUX DE BOISSON HYPER FLUOREES DU SENEGAL PAR TECHNIQUES MEMBRANAIRES : nanofiltration

e-mail: [courfia@ucad.sn](mailto:courfia@ucad.sn)

## *Problématique*

Les eaux saumâtres ou faiblement saumâtres sont disponibles en très grande quantité dans tout le bassin sénégalais. Néanmoins l'eau potable reste encore une denrée extrêmement rare dans ce pays.

Au Sénégal, les eaux saumâtres ont des teneurs excessives en fluorures. Alors que les normes de potabilité sous climat tropical sont de 0,7 à 1,5 mg/l (à 25°C) (valeurs adoptées par l'OMS et la CEE), les concentrations en fluorure couramment rencontrées dans certains milieux varient de 5 à 15 mg/l selon la saison et peuvent exceptionnellement atteindre des pointes maximales de 20 mg/l. Les concentrations sont élevées avant la saison des pluies et chutent de moitié entre juin et octobre à cause de la dilution.

La présence d'ions fluorures dans les eaux de boisson en tant qu'oligo-éléments est nécessaire et bénéfique pour l'organisme à de faibles taux mais, dès que la concentration augmente, elle conduit à des maladies comme les fluoroses dentaires et osseuses. De nos jours l'intoxication au fluor est aiguë dans certaines régions du Sénégal et représente un véritable problème de santé publique. Il n'existe actuellement pas de solution sauf des tentatives d'installation de pilote en osmose inverse.

L'objet de ce document est la présentation d'une nouvelle méthode de défluoruration sélective des eaux du Sénégal et de dessalement partiel en vue de la production d'une eau de boisson potable : la **nanofiltration**.

Avec plus de 30 milliards de m<sup>3</sup> de réserve d'eau évaluée par la présence de la nappe maestrichtienne, cette technique pourrait dans l'avenir en faire la réserve d'eau potable la plus importante du pays.

## Proposition

Actuellement sur le plan mondial les techniques de membranes sont les plus courantes concernant le dessalement de l'eau.

Procédé	Source d'énergie	Type de membrane	Principe de séparation	Principales applications
Dialyse	Gradient de concentration	microporeuse	filtration	rein artificiel
Microfiltration	Différence de pression (0,1 - 1 bar)	microporeuse	filtration	bactéries
Ultrafiltration	Différence de pression (0,5 - 10 bar)	microporeuse	filtration	Concentration de solution macromoléculaire
<b>Nanofiltration</b>	Différence de pression (5- 20 bar)	Microporeuse Et/ou dense	Filtration/interaction électrostatique	<b>Adoucissement partiel de l'eau</b>
Osmose Inverse	Différence de pression (8- 100 bar)	dense	diffusion	<b>Dessalement de l'eau</b>

Tableau 1: Différence de pression et de l'énergie de transfert.

L'**Osmose Inverse (OI)** est une technique de membrane qui occupe une place de choix de par le nombre et la qualité des installations implantées au Moyen Orient (pays du golfe arabe), en Amérique, en Asie et en Europe principalement sur le dessalement.

La sélectivité des membranes d'OI est d'origine chimique, basée essentiellement sur le mécanisme de solubilisation-diffusion pour le transfert des solutés. L'osmose inverse est une technique très efficace pour éliminer la quasi totalité des sels minéraux présents en solution; mais pour les besoins d'une eau de boisson, il faut reminéraliser ensuite l'eau obtenue après traitement (sans fluor) pour qu'elle puisse être considérée comme potable.

En ce qui concerne le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres non contaminées, la reminéralisation peut se faire avec de l'eau brute. Ce qui n'est pas possible dans le cas d'espèce puisque l'eau contient beaucoup de fluorure.

Ceci rend les coûts de traitement très élevés pouvant entraîner des difficultés de moyens de vulgarisation du prototype sur les localités sénégalaises classées en urgence.

A propos de la défluoruration des eaux du Sénégal nous proposons la nanofiltration qui n'est pas à proprement parlé une nouvelle technique, mais son domaine, compris entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, est particulièrement étudiée depuis peu d'années. La sélectivité est à la fois d'origine chimique (solubilisation-diffusion) et physique (convection). Sous certaines conditions, la nanofiltration permet non seulement une décontamination bactérienne totale, mais aussi d'éliminer préférentiellement les fluorures et de garder une

minéralisation suffisante à l'eau pour qu'elle soit directement potable et ceci à un coût global très inférieur à celui de l'osmose inverse.

Par exemple, l'eau de Méry-sur-Oise qui fut parmi celles de plus mauvaise qualité en île de France, est devenue de façon certaine, avec la nanofiltration, l'une des meilleures grâce à l'installation sur site d'une usine d'une capacité d'environ 200 000 m<sup>3</sup>/jour fournissant une eau potable «sans goût de chlore» avec élimination des pesticides. Ce pilote alimente 37 communes regroupant 800 000 habitants.

Le coût du traitement est trois à quatre fois moins élevé en nanofiltration (90 FCFA/m<sup>3</sup>) qu'en osmose inverse (500 FCFA/m<sup>3</sup>). Pour une même pression, le débit est environ cinq fois plus élevé en nanofiltration (12,8 l.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.bar<sup>-1</sup>) qu'en osmose inverse (2,6 l.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.bar<sup>-1</sup>).

La faible consommation énergétique permet d'envisager l'alimentation des installations par des capteurs solaires pour les zones isolées. Le coût énergétique d'une opération peut considérablement être abaissé en travaillant à des pressions plus basses pour le même débit de perméat. Par exemple l'osmose inverse donne une consommation énergétique de 4 Kwh.m<sup>-3</sup> à une pression de 10 bar avec un taux de fuite de 10% pendant que la nanofiltration donne 2,3 Kwh.m<sup>-3</sup> pour une pression de 6 bar et un taux de fuite maintenu à 10%.

L'inconvénient de la nanofiltration est qu'il faut adapter les conditions opératoires à chaque type d'eau. C'est dans ce cadre qu'un traitement d'échantillons réels prélevés à Kaolack, Fatick, Gossas et Diourbel est prévu du 1<sup>er</sup> Février au 31 Juillet 2002 au département "Eau Potable et techniques Séparatives" de Vivendi water, centre de Maisons - laffite à Paris.

Les cibles sont localisés dans des zones particulièrement sensibles au problème de fluorose.

Les résultats très probants exposés ci-dessous sont obtenus à partir de solutions synthétiques au laboratoire "Hydrosciences" de l'Université de Montpellier II. Ces résultats ont contribué à mettre en évidence les avantages spécifiques de la nanofiltration sur l'osmose inverse:

\*\*les sels divalents sont mieux retenus que les sels monovalents; la nanofiltration est un excellent procédé d'adoucissement d'eau saumâtre.

\*\*la déminéralisation sélective et partielle en nanofiltration rend inutile la reminéralisation après traitement.

\*\*l'élimination sélective du CODB (carbone organique dissous biodégradable) permet de réduire les quantités d'oxydants (chlore) injectées dans les eaux destinées à la boisson avant stockage.

Note sur l'entretien et la maintenance d'un pilote:

Les opérations de pré-traitement et de post-traitement sont souvent nécessaires pour compléter un traitement par membrane.

Nous devons les simplifier au maximum (filtre, chloration) et adapter les conditions opératoires en conséquence (taux de conversion, pression, vitesse de circulation) afin de se rapprocher le mieux possible des critères de fonctionnement sur site isolé.

La notion d'entretien et de maintenance doit être mise en avant dans un programme d'installation de pilote sur site afin que les techniciens prennent conscience de l'importance du suivi et de la maintenance sur la viabilité de l'ensemble de l'unité de traitement.

\*\*\*Surveillance du niveau de l'huile dans la pompe

\*\*\*Respect des consignes d'utilisation: pas de démarrage en pression après arrêt, rinçage à l'eau déminéralisée avant arrêt,...

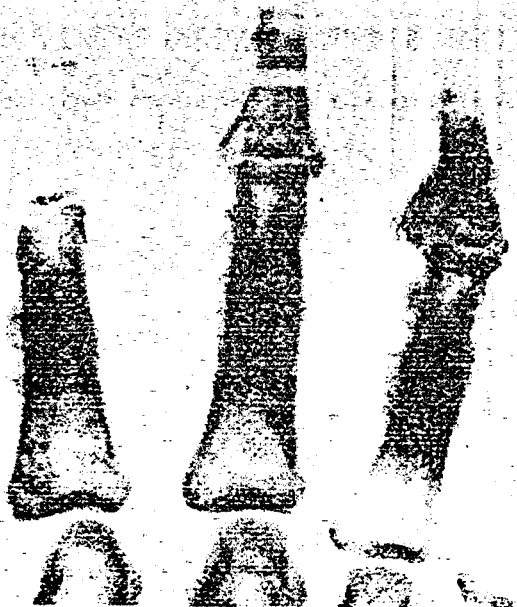
\*\*\*Planification du remplacement périodique des membranes; au Sénégal pour des raisons de maintenance, les conditions de fonctionnement peuvent être adaptées de sorte à améliorer la durée de vie des membranes (#2 ans).

\*\*\*Lorsque la perméabilité des membranes chute de 20% de son débit initial, un rinçage chimique est nécessaire: utiliser une solution d'hydrogencitrate d'ammonium  $10^{-2}$  molaire pendant 30 minutes suivi d'un rinçage abondant à l'eau déminéralisée.

\*\*\*En cas de reminéralisation en vue d'élever la dureté de l'eau traitée, l'utilisation de produits locaux comme le  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  peut être conseillée à la place du carbonate de calcium.

# APPLICATION

Exemples de contamination due à une consommation durable d'eau hyperfluorée (*fluorose dentaire, osseuse ou articulaire*)



Source: thèse de Doctorat Institut Odonto-Stomatologie; UCAD

### Matériel et méthode:

Les réactifs utilisés sont des sels purs pour analyse et les solutions ont été préparées à partir d'eau déminéralisée. La membrane utilisée de type filmtec NF45, de 2,1 m<sup>2</sup> de surface avec une couche active en polyamide et à seuil de coupure égal à 200 daltons. Le pilote de nanofiltration comporte une pompe à débit variable, un manomètre et une vanne permettant de régler la pression ainsi que deux débitmètres sur les circuits de perméat et de rétentat. Les analyses des sels de sodium et de lithium ont été faites par conductimétrie, après étalonnage pour chaque sel. Et pour une meilleure fiabilité dans la comparaison des résultats, toutes les valeurs sont données par rapport à une température de 20°C.

Toutes les manipulations sont faites à un faible taux de conversion (30%) et à fort flux tangentiel dans le but de s'affranchir des phénomènes parasites qui permettent de négliger les facteurs de polarisation et de minimiser les résistances aux transferts dans les solutions.

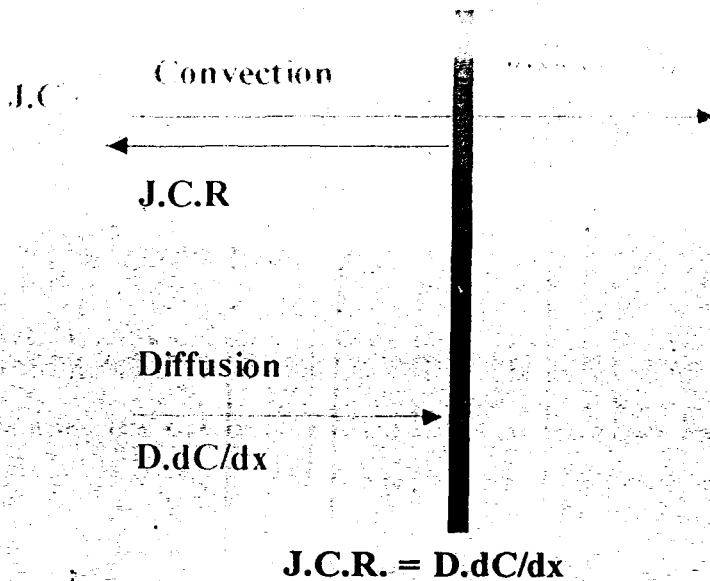


Figure1: Comportement d'une membrane nF lors d'une opération de dessalement

### Résultats expérimentaux:

Selon les conditions opératoires décrites, les résultats pour les sels étudiés sont condensés dans les tableaux 2 et 3. Les pourcentages de rétention sont aussi représentés sur la figure 3.



Tableau 2: Résultats expérimentaux avec : Taux de conversion  $Y = 30\%$  et Température  $T = 20^\circ\text{C}$ 

$C_0(\text{sel})$	$J(\text{l/h})$	$C_p$	$C_{\text{conv.}}$	$J_{\text{diff.}}$	$C_{\text{diff.}}$	R%
<b>NaF</b> 0,02M	30	0,001719	0,000115	0,0474	0,00158	91,405
	40	0,001190	0,000115	0,0474	0,00118	94,050
	50	0,001058	0,000115	0,0474	0,00095	94,710
	60	0,000925	0,000115	0,0474	0,00079	95,375
	70	0,000793	0,000115	0,0474	0,00068	96,035
<b>NaCl</b> 0,02M	30	0,009421	0,00563	0,0992	0,00331	52,875
	40	0,008454	0,00563	0,0992	0,00248	57,730
	50	0,007488	0,00563	0,0992	0,00198	62,560
	60	0,007004	0,00563	0,0992	0,00165	64,980
	70	0,006753	0,00563	0,0992	0,00142	66,235
<b>NaI</b>	30	0,011170	0,00787	0,0782	0,00261	44,150
	40	0,009973	0,00787	0,0782	0,00195	50,135
	50	0,009441	0,00787	0,0782	0,00156	52,795
	60	0,009000	0,00787	0,0782	0,00120	54,700
	70	0,008600	0,00787	0,0782	0,00080	56,600

Tableau 3: Résultats expérimentaux avec : Taux de conversion  $Y = 30\%$  et Température  $T = 20^\circ\text{C}$ 

$C_0(\text{sel})$	$J(\text{l/h})$	$C_p$	$C_{\text{conv.}}$	$J_{\text{diff.}}$	$C_{\text{diff.}}$	R%
<b>LiF</b> 0,02M	30	0,002340	0,000976	0,0342	0,00141	88,300
	40	0,001914	0,000976	0,0342	0,00085	90,430
	50	0,001595	0,000976	0,0342	0,00068	92,025
	60	0,001489	0,000976	0,0342	0,00057	92,555
	70	0,001382	0,000976	0,0342	0,00049	93,090
<b>LiCl</b> 0,02M	30	0,007978	0,00498	0,0800	0,00267	60,110
	40	0,007313	0,00498	0,0800	0,00200	63,435
	50	0,006781	0,00498	0,0800	0,00160	66,095
	60	0,006117	0,00498	0,0800	0,00133	69,415
	70	0,005585	0,00498	0,0800	0,00114	72,075

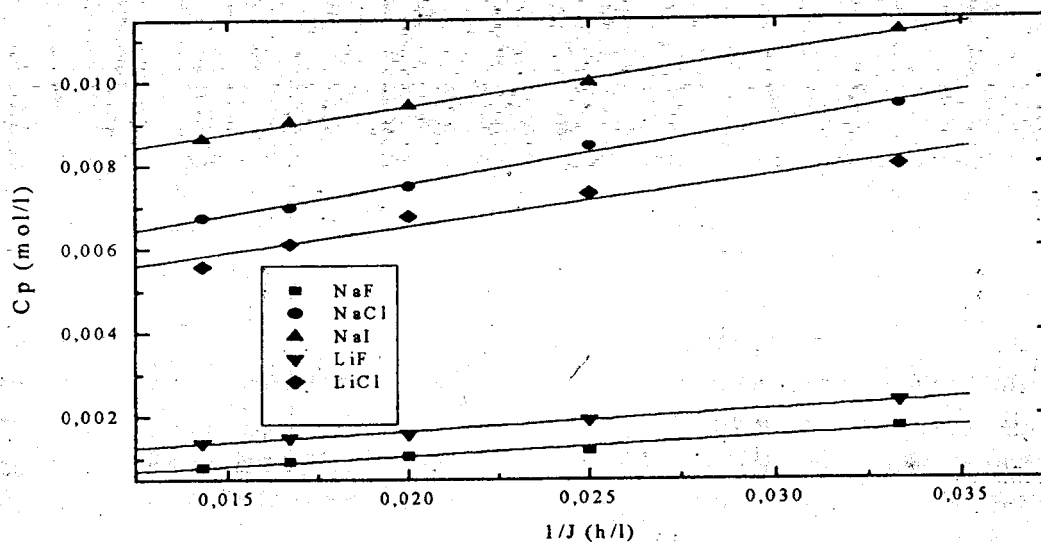


Figure 2: Evolution du produit  $C_p$  (mol/l) en fonction de l'inverse du flux en nanofiltration avec  $A=Na, Li$  et  $X=F, Cl, I$ .

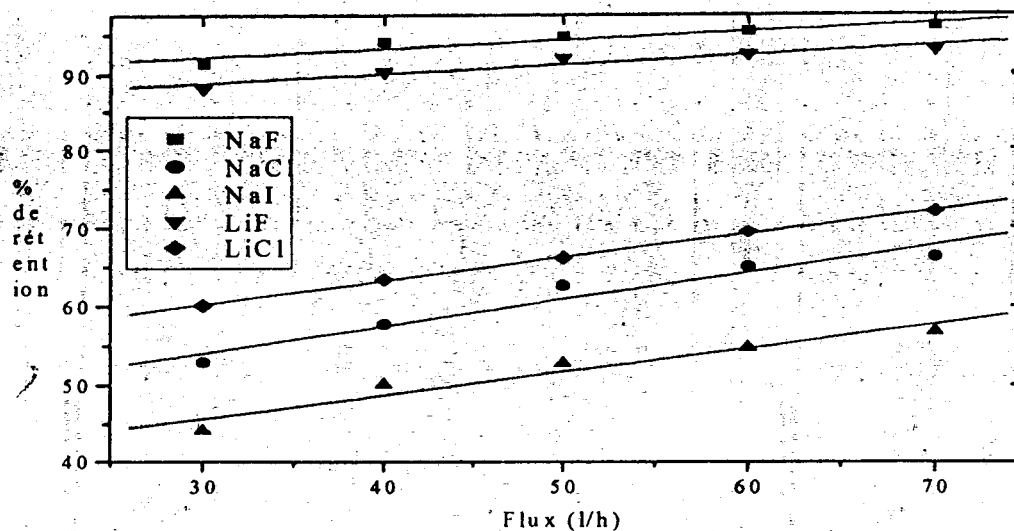


Figure 3: Taux de rétention des sels de types AX en fonction du flux de solvant avec  $A=Na, Li$  et  $X=F, Cl, I$ .

**Interprétation:**

Le fait d'être intermédiaire entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, justifie que la nanofiltration est le lieu de deux phénomènes simultanés mais additifs du point de vue transfert de soluté.

L'un des phénomènes montre que seuls les composés solubles dans la membrane peuvent la traverser par un mécanisme de solubilisation-diffusion. La sélectivité de la membrane est beaucoup plus liée au coefficient de partage entre la

membrane et la solution qu'au coefficient de transfert. Cette sélectivité est donc essentiellement d'origine chimique et fonction des propriétés solvatantes de la membrane, ainsi que de l'énergie d'hydratation pour chaque soluté. Dans une telle situation la membrane gonflée à l'eau se comporte comme un solvant hydro-organique ayant des propriétés de solvation spécifiques. C'est un mécanisme de type diffusionnel que l'on observe en osmose inverse, qui est indépendant du débit du solvant, de la pression et ne dépend que du gradient de concentration de part et d'autre de la membrane.

Avec l'autre phénomène, seuls les solutés de diamètre inférieur à celui des pores de la membrane traversent ; le transfert se fait par convection sélective exactement comme en ultrafiltration. Les ions secs ont des rayons relativement petits contrairement aux ions hydratés qui sont bien retenus par convection suivant la pression qui agit sur l'énergie d'hydratation. Le flux total de soluté peut alors être considéré comme la résultante des flux diffusifs et convectifs.

$$j = j_{diff} + J \cdot C_{conv}$$

Avec  $J = A \cdot (P - \Delta\Pi)$

J: flux de solvant

j: flux de soluté

C: concentration

A, représentant la perméabilité de la membrane au solvant dans les conditions physico-chimiques données. On obtient alors

$$J = j_{diff} + A \cdot (P - \Delta\Pi) C_{conv}$$

La concentration dans le perméat devient alors

$$C_p = j_{diff}/J + C_{conv}$$

La courbe expérimentale  $C_p = f(1/J)$  doit être une droite d'ordonnée à l'origine  $C_{conv}$  et de pente  $j_{diff}$  (figure 2). Ce qui a permis de déterminer expérimentalement les valeurs du flux de diffusion  $j_{diff}$  et de la concentration de soluté  $C_{conv}$ , entraînées sélectivement par convection.

Dans les solvants organiques (la membrane peut être considérée comme solvant hydro-organique), les molécules sont beaucoup plus solvatées que les sels ; ce qui permet de considérer que les différences de solvation entre chacun des sels par la membrane sont faibles. En plus l'énergie de solvation des différents solutés par la membrane est difficile à évaluer. Par contre l'énergie d'hydratation, qui est très forte pour les sels, peut beaucoup varier d'un sel à un autre et peut être facilement évaluée. Cette énergie est fonction du carré de la charge et inversement proportionnel au rayon (ou racine cubique de la masse molaire). Le diamètre de sel est lié à sa masse molaire par la relation  $d = 1,34M^{1/3}$ .

A des valeurs connues de l'énergie d'hydratation[20], on peut tracer une courbe :  $E_{hyd} = f(q^2/M^{1/3})$ .

$$E_{hyd} = 136 + 604(q^2/M^{1/3}) + 555(q^2/M^{1/3})^2$$

Cette relation permet à partir des seules masses molaires, pour une charge donnée, de déterminer les énergies d'hydratation des solutés avec une assez bonne approximation ; ce qui simplifie largement les possibilités de prévisions lorsqu'on se trouve en présence de membrane pratiquement inerte ou non chargée. Dans le cas des membranes réactives et/ou chargées, l'énergie de solvatation par la membrane ne peut plus être considérée comme une constante caractéristique de celle-ci ; il est alors nécessaire de connaître son affinité pour les différents solutés.

Les pourcentages de rétention R calculés à partir de Cp (tableaux 2/ et 3) montrent bien que les fluorures, avec une énergie d'hydratation supérieure à celles des chlorures et des iodures, soient beaucoup mieux retenus (figure 3) malgré leur relative petitesse (le fluorure est en effet le plus petit des anions).

### Conclusion

De par la complexité de la nanofiltration, celle-ci est plus difficile à aborder et à mettre en œuvre que les autres techniques à membrane mais offre d'énormes possibilités au niveau de la sélectivité de rétention des sels (sulfates, fluorures, matières organiques, pesticides... ). Il est nécessaire d'étudier séparément les différents mécanismes de transfert (physique et chimique) pour mieux les maîtriser et de pouvoir faire des prévisions sur les rétentions.

Dans ce travail les résultats expérimentaux montrent qu'à partir d'une eau saumâtre hyperfluorée, on peut sélectivement retenir les fluorures (plus de 80%) en présence d'autres ions. Il est alors possible de modifier et de maîtriser la sélectivité entre les différents solutés en jouant sur les conditions opératoires. En optimisant les paramètres opératoires l'eau traitée reste faiblement minéralisée et à la minéralisation souhaitée (normes en vigueur). Elle peut donc être directement potable c'est à dire ne nécessiter aucun traitement supplémentaire pour être considérée comme eau de boisson normale.

La nanofiltration peut raisonnablement s'appliquer aux eaux saumâtres hyperfluorées rencontrées au Sénégal en vue d'atteindre la quantité de fluor cario protectrice et non toxique appelée <<dose optimale de fluor dans l'eau de boisson>>. Elle s'applique aussi bien aux petites installations qu'aux grandes.

## Bibliographie:

- A. A. YAM, M. D. NDIAYE, M. BADIANE, G. SAWADOGO ; Détermination de la dose optimale de fluor dans l'eau de boisson au Sénégal. Eau, Eaux Pluviales, Pollution. 1995, N°6, 488-490.
- A. LHASSANI, D. BENJELLOUN, M. RUMEAU ; Essai d'interprétation des mécanismes de transfert des sels en nanofiltration. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 96-103.
- A. LHASSANI, M. RUMEAU ; Transfert des solutés à travers les membranes et sélectivité en nanofiltration. «Tribune de l'eau» 1999 N°599/3, 13-17.
- A. MAUREL ; Techniques séparatives à membranes osmose inverse, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration tangentielle Considérations théoriques. J 2790, 1-22.
- C. VENTRESQUE, G. TURNER, G. BABION ; Nanofiltration: from prototype to full scale. journal AWWA. 1997, 89(10), 65-75.
- Degrémont ; Mémento technique de l'eau, tome I, chap.8 réglementation.
- H. J. M. JAAP, H. ROORDA ; New developments in upgrading Wastewater treatment plant effluent by ultrafiltration. «L'eau et les techniques membranaires» 154-159.
- M. PERRON
- J. M. LAINE ; Ultrafiltration membrane status after 10 years of operation. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 16-20.
- L. D. BOURLIER, L. BAUDIN, K. GLUCINA ; Treatment combinations with ultrafiltration and its application to drinking water production. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 48-54.
- M. DEGREGZ, E. PAQUAY ; Réalisation d'un cahier de charges pour le choix d'une technologie de recyclage des eaux usées industrielles. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 151-153.
- M. PONTIE, M. RUMEAU, M. NDIAYE, C. M. DIOP ; Synthèse sur le problème de la fluorose au Sénégal : bilan des connaissances et présentation d'une nouvelle méthode de défluoruration des eaux de boisson «Cahier santé» 1996, 6, 27-36.
- M. PONTIE, M. RUMEAU C. M. DIOP ; Défluoruration par les techniques à membranes. Séminaire à l'Ecole Nationale Supérieure Universitaire et Technologique – Dakar, 1993.
- M. PONTIE, O. SARR, M. RUMEAU ; «L'eau, l'industrie, les nuisances» N° 210, 57-62
- M. RUMEAU ; Généralités sur les procédés à membranes. «semaine ATHENS» 1999.
- M. RUMEAU ; La nanofiltration : principes, performances et applications. «informations chimie» 1995, N° 373, 93-98.
- M. RUMEAU, M. PONTIE ; Potabilisation d'une eau saumâtre hyperfluorée du Sénégal par déminéralisation sélective. «Hydrotop» 1998
- P. COTE ; Utilisation des membranes immergées en production d'eau potable. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 69-73.
- R. GIMBEL, G. HAGMEYER ; Use of membrane in Germany to produce drinking water. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 32-38.
- S. NOMET, P. ROTH ; Application de procédés membranaires pour le traitement d'eau usée chargée en tensioactif. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 160-170.
- W. DOYEN, L. BEEUSAERT, B. BAEE ; Exploration of possibilities of UF as an alternative pre-treatment step for drinking water production. «L'eau et les techniques membranaires» 2000, 55-63.