

FILTRATIONS MEMBRANAIRES ET QUALITE DE L'EAU DE BOISSON EN AFRIQUE : *Cas du fluor au SENEGAL*

C. K. DIAWARA^{1*}, H. ESSI-TOME², A. LHASSANI³, M. PONTIE⁴, H. BUISSON⁵

1 - Laboratoire de Chimie Minérale et Analytique , Université Cheikh Anta Diop, Dakar Sénégal

Tél. : +221 825 02 02 – Fax : +221 824 63 18 – E-mail : courfia@ucad.sn

2 - Laboratoire de Sciences Physiques Fondamentales et Appliquées, Ecole Normale Supérieure d'Abidjan, 08 B.P. 10 Abidjan 08 Côte d'Ivoire ;

3 - Département de chimie, Faculté des Sciences et Techniques Fès - Saïss, B.P. 2202, FES, Maroc ;

4 - École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, Laboratoire d'Électrochimie et de Chimie Analytique UMR CNRS n°7575, ACI JC n°4052, 11 rue Pierre et Marie Curie, F-75231 Paris Cedex 05, France ;

5 - Véolia Water, Anjou Recherche, Chemin de la Digue, B.P. 76, 78603 Maisons - Laffite Paris, France ;

Résumé

Les effets des sels minéraux contenus dans les eaux de boisson, bénéfiques ou néfastes en fonction de leur concentration, sont connus depuis de nombreuses années [1]. « Aujourd'hui déjà plus de 1,5 milliards de personnes n'ont pas accès à une eau potable saine. Selon l'OMS, ce sont 15 millions d'être humains qui meurent chaque années après avoir bu de l'eau non potable, ou faute de n'avoir pas accès à l'eau potable [2]». De nombreux pays possédant des régions où certaines eaux présentent des teneurs en fluor supérieures aux recommandations de l'OMS (0,7-1,5 mg/L suivant la température): Sénégal, Kenya, Afrique du nord... cependant, face à des facteurs comme l'accroissement démographique et la relative rareté des eaux de pluie dans certaines zones, les ressources en eaux alimentaires et de bonne qualité se font de plus en plus rares. Le fluor est utile contre les caries et durcit l'émail des dents ; à plus forte concentration il fragilise les os ou provoque des points de cristallisation favorisant l'apparition d'arthroses articulaires déformantes : c'est la fluorose[3].

Ce travail se propose de faire un état de l'art sur les possibilités de traitements chimiques et/ou membranaires des eaux de boisson naturellement riches en fluor dans le contexte d'un développement durable en afrique. Les opérations de filtration, de séparation membranaire ont envahi le monde moderne et sont utilisées quotidiennement dans les industries où elles occupent une place de plus en plus importante.

Aussi ce travail expose une étude de cas de cinq villes du Sénégal présentant des concentrations en fluor au dessus des normes. Grâce à la mise en œuvre d'une technique membranaire (nanofiltration) tenant compte des paramètres hydrodynamiques [4] comme le facteur de concentration volumique, la pression, la vitesse de circulation, le débit etc..., nous avons pu passer de 4,45 mg/L en fluor et 291 mg/L en chlorure à des concentrations inférieures à 1 mg/L en fluor et 100 mg/l en chlorure.

Mots clés : eau potable ; fluor ; nanofiltration.

I – INTRODUCTION

Les effets des fluorures contenus dans les eaux de boisson, bénéfiques ou néfastes en fonction de leur concentration, sont connus depuis de nombreuses années [1,5,6]. Sur le plan physiologique le fluor est un oligo-élément nécessaire et bénéfique pour l'organisme. Certains pays ont connu pendant plusieurs années la supplémentation systématique en fluor chez les enfants, voire même les femmes enceintes [7]. En France, un arrêté interministériel du 31 octobre 1985 a autorisé la fabrication et la vente de sel de table fluoré à 250 mg/kg de sel[8]; même si l'usage n'est cependant pas autorisé dans les collectivités ou dans l'industrie alimentaire. Le fluor est utile contre les caries et durcit l'émail des dents ; à plus forte concentration il fragilise les os ou provoque des points de cristallisation favorisant l'apparition d'arthroses articulaires déformantes : c'est la fluorose [9]. La consommation courante d'une eau de concentration en ions fluorure entre 2 et 4 mg/L par un enfant de moins de six ans entraîne inéluctablement une **fluorose dentaire** qui se traduit par des dents marbrées (coloration définitivement jaune ou marron foncé). La fluorose dentaire se définit comme étant une hyperminéralisation de l'émail dentaire induite par le fluor à proximité de la dent en développement pendant la phase sécrétoire et de maturation des phénomènes menant à la formation de l'émail. Lorsque la concentration en ions fluorure est supérieure à 4 mg/L avec une exposition d'au moins 2 années consécutives, il se produit dans le temps une **fluorose osseuse** qui se traduit par des problèmes de santé beaucoup plus importants (gonflement des membres supérieures et/ou inférieures, déformation de la colonne vertébrale, blocage de certaines articulations...).

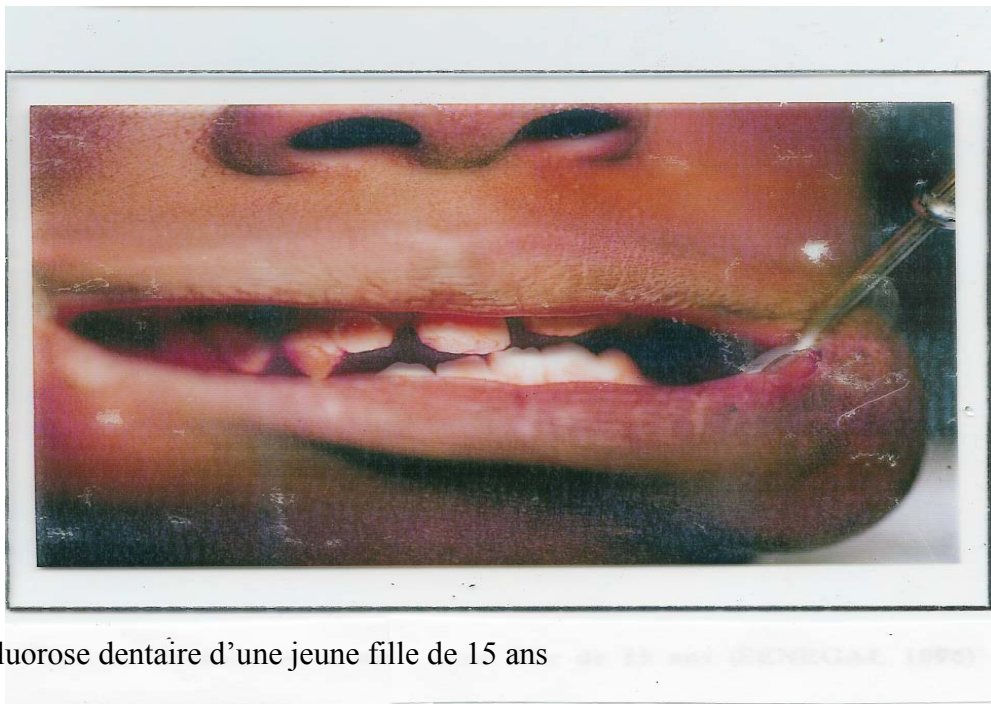


Figure 1: fluorose dentaire d'une jeune fille de 15 ans

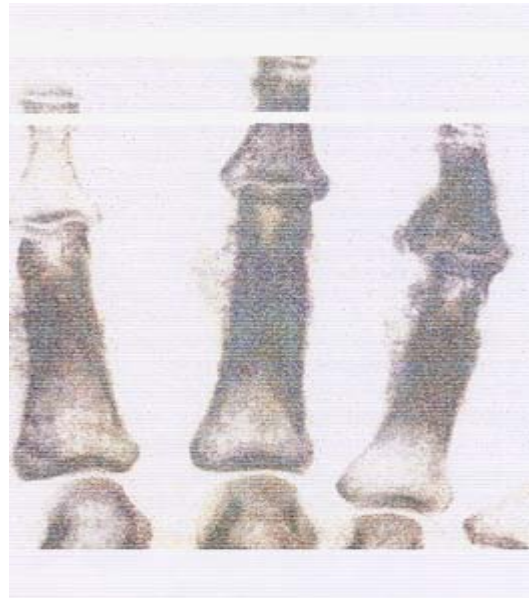


Figure 2: *Fluorose osseuse au niveau de la main d'un tailleur au Sénégal*

La réglementation concernant la qualité de l'eau destinée à la consommation pour le fluor tient compte, en principe, de la consommation journalière et de la température moyenne du milieu. Exemple de quelques normes en vigueur:

- Institut Sénégalais de Normalisation (ISN) : 2 mg/L
- Normes Françaises (décret 2001 – 1220) : 1,5 mg/L
- Recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) : 1,5 mg/L suivant la température.

De nombreux pays producteurs de phosphates, et dont la présence de minerais de phosphates (hydroxy-apatite) est souvent associée à celle de minerais de fluor (fluoro-apatite), possèdent des régions où certaines eaux en provenance des nappes captives présentent des teneurs en fluor supérieures aux normes: Moyen orient, Afrique du nord, Sénégal, Kenya, Inde, USA, France.....cependant, face à des facteurs comme l'accroissement démographique et la relative rareté des eaux de pluie dans certaines zones, les ressources en eaux alimentaires et de bonne qualité se font de plus en plus rares. « Aujourd'hui déjà plus de 1,5 milliards de personnes n'ont pas accès à une eau potable saine. Selon l'OMS, ce sont 15 millions d'être humains qui meurent chaque années après avoir bu de l'eau non potable, ou faute de n'avoir pas accès à l'eau potable [2,10]». La possibilité de prélever l'eau de surface qui, pour être consommable, nécessite une dépollution très difficile à réaliser et à développer en raison des activités humaines diverses et croissantes. Le traitement des eaux fluorées des réserves souterraines devient alors progressivement une nécessité.

Ce travail se propose de faire un état de l'art sur les possibilités de traitements chimiques et/ou membranaires des eaux de boisson naturellement riches en fluor dans le contexte d'un développement durable en Afrique. Aussi ce travail expose une étude de cas de cinq villes du Sénégal présentant des concentrations en fluor au dessus des normes.

II - ETAT DE L'ART

II-1 PROCÉDES CHIMIQUES

Réaction de précipitation

Ce procédé fréquemment utilisé en traitement de l'eau, utilise des quantités importantes de réactifs et dans certains cas entraîne l'apparition d'éléments indésirables.

Coagulation – Flocculation – Décantation

Elle se fait en trois étapes et sa cinétique conditionne le dimensionnement des appareils dont la mise en œuvre n'est pas toujours aisée.

L'exploitation d'un de nos résultats de Jar test sur une eau du réseau de Maisons Laffite(Paris) dopée en fluorures de sodium, à la limite puis au dessus de la saturation en coagulant (CaCO_3) avec et sans flocculant WAC HB, a permis de valider cette méthode. La présence de carbonate dissous dans le milieu entraîne une compétition avec les ions fluorure, du moins, lorsque le titre alcalimétrique complet(TAC) est inférieure à 15°F. Lorsque la quantité de carbonate est maximale, le taux d'élimination des fluorures reste sensiblement le même quelle que soit la sursaturation en coagulant ou l'ajout de WAC HB qui ne pourra qu'améliorer la taille des floes (tableau 1) donc le temps de décantation, mais pas l'abattement en fluorure résiduel. Le WAC HB est un PACS (PolyAluminium ChloroSulfate) de haute basicité.

[NaF]initial=5ppm	J1	J2	J3	J4	J5
Coagulant (mg)	10	50	100	250	500
F ⁻ résiduel (ppm)	2,42	2,48	2,26	2,34	1,96
Coagulant (mg)	10	50	100	250	500
Flocculant (ppm)	10	10	10	10	10
F ⁻ résiduel (ppm)	2,06	2,16	2,34	2,00	2,16

Tableau 1 Résultats de différents Jar - tests à Veau = 1 L, pH = 8,06 et T = 20°C

Ce procédé qui a pour inconvénient d'être discontinu en jar - test, nécessite une décantation après l'étape de coagulation - flocculation et engendre de fortes quantités de réactifs.

Sulfate d'aluminium

Cette méthode a fait l'objet de plusieurs études notamment dès 1934 par Boruff[11], en 1936 par Kempf et al.[12], en 1958 par Culp and al.[13], en 1984 par Travy[14] et récemment en février 2000, revue par Rebeyrol et Euzen. Le sulfate d'aluminium, sous forme de poudre granulométrique de 2,5 à 25 μm , se dissout en milieu aqueux avec une apparition concomitante d'une co-précipitation d'hydroxyde et de fluorure d'aluminium. En plus de la nécessité d'une quantité élevée de produit pour une faible teneur en fluorure, la concentration en sulfate devient très élevée dans l'eau traitée lorsqu'on utilise le sulfate d'aluminium. Cependant dans les cas où le sulfate d'aluminium est remplacé par du

polychlorosulfate basique d'aluminium, la teneur en sulfate n'est pas modifiée à cause du pouvoir flocculant mais celle des chlorures s'élève de 28% environ par rapport à l'eau brute. Ce qui pose le problème d'apparition d'ions indésirables. Mazounie et Mouchet [15] ont constaté une évolution du fluor résiduel en fonction du pH à dose constante de sulfate d'alumine, et ont trouvé que la zone de pH pour une élimination optimale des fluorures par cette méthode, se situe au voisinage de pH = 6,5.

Des résultats de laboratoires qui n'ont pas encore fait l'objet d'expérimentation à l'échelle industrielle montrent qu'il est possible de rendre potable une eau contenant un excès de fluor par utilisation du phosphate d'aluminium [16]. Leurs auteurs soutiennent que c'est une méthode meilleure que celles en cours puisque qu'elle est extensible à d'autres sels, couvre une très large gamme de pH et reste moins sensible aux variations de températures.

Défluoruration par adsorption

Ce procédé est bien adapté à l'élimination spécifique du fluor avec une nécessité de maîtriser le pH du milieu. Des études approfondies sur l'utilisation d'adsorbant locaux dans les pays en développement pourrait baisser les coûts de façon significative et rendre le procédé plus attrayant. Les matériaux adsorbants actuels présentent une faible durée de vie et les difficultés de leur régénération limitent la possibilité d'utilisation à grande échelle.

Alumine activée

L'alumine activée est obtenue par calcination, sans dépasser 500°C, de l'alumine hydratée $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ provenant d'une attaque alcaline de la bauxite. La filtration sur alumine activée intéresse un large domaine d'activités. L'alumine activée est susceptible de fixer des anions comme des cations; on parle dans la littérature d'échange d'ions, de précipitation, de polymérisation et d'adsorption [17-20]. Rappelons que la surface des aluminés est constituée d'acides de Brønsted et d'acides de Lewis dont seuls les premiers seraient actifs.

Il ressort de la littérature que les données sur la capacité de rétention des ions fluorure de cet adsorbant varient considérablement d'un auteur à l'autre en fonction de différentes conditions opératoires. Les paramètres comme la granulométrie du matériau filtrant, la concentration initiale en fluorure, l'alcalinité et le pH de l'eau brute sont des paramètres très influents sur la capacité de fixation des ions. Néanmoins, l'alumine activée assure de façon fiable une élimination spécifique de l'ion fluorure (> 80%) avec de plus une élimination quasi totale du fer présent dans la solution. Cependant son manque d'efficacité sur l'élimination de la salinité compromettrait la pertinence de son utilisation pour le traitement des eaux saumâtres fluorurées. C'est pourquoi sa mise en œuvre devrait tenir compte des critères techniques (caractéristiques de l'eau à traiter) et économiques (coût de la régénération au sulfate d'alumine ou à la soude et à l'acide, ou bien à l'aluminate de soude qui pourraient être remplacés par des produits locaux tel que le charbon de noix de coco).

La régénération au sulfate d'alumine ne dépend pas de sa concentration ; 70 kg de sulfate d'alumine sont obtenus par mètre cube d'alumine activée traitée et ce système est plus rentable lorsqu'on procède

à une régénération à co-courant suivie d'un lavage à contre courant. Le fer est totalement éliminé en même temps pendant qu'on assiste à un relargage d'aluminium dans l'eau traitée.

La régénération à la soude se fait en deux étapes : contre courant et co-courant avec un lavage intermédiaire à l'eau. Ensuite on neutralise progressivement le lit filtrant par de l'eau brute acidifiée à l'acide sulfurique.

La régénération à l'acide sulfurique se fait à contre courant avec dégagement de dioxyde de carbone et obtention d'une solution de pH 3,5 environ. Cette méthode est moins onéreuse et son efficacité est en moyenne meilleure que celle au sulfate d'alumine.

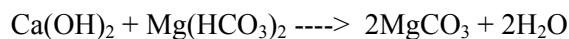
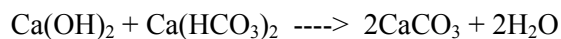
La régénération à l'aluminate de soude est techniquement possible mais n'est pas compétitive économiquement.

Il ressort de ces différentes méthodes de régénération que celle à la soude s'avère en moyenne plus efficace et moins coûteuse que les autres, bien que sa mise en œuvre soit plus compliquée.

Décarbonatation à la chaux

L'excès de chaux en présence d'hydrogencarbonate de calcium et de magnésium, produit une co-précipitation du carbonate de calcium et surtout de la magnésie qui adsorbe le fluor. C'est une méthode employée pour des eaux fortement magnésiennes avec de faibles teneurs en ions fluorure. Par exemple une concentration de 130 ppm en magnésium est nécessaire pour adsorber 4 ppm de fluorures. Une installation industrielle basée sur ce principe a été construite à Bloomdale (Ohio, USA) où la teneur en fluorure a été réduite de 2,2 à 1,2 mg/L.

Les réactions chimiques sont décrites comme suit :



Matériaux à faible coût

Ce sont des produits naturels en quantité inestimable disponibles dans l'environnement africain et qui présentent une capacité d'adsorption de l'ion fluorure en fonction du temps de contact, du pH puis de la quantité utilisée. Ces matériaux connus sous les noms de bentonite, charfine, kaolinite, lignite et la graine nirmali peuvent sous certaines conditions, extraire environ 40% de fluorures. La bauxite activée à un rendement inférieur à celui de l'alumine activée; mais la combinaison de son faible coût et de sa facilité d'accès, la rend très attrayante.

Défluoruration par échange d'ions

L'Apatite

Le précipité de fluoroapatite insoluble ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaF_2) s'obtient à partir de l'apatite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaCO_3), en présence de fluorures de calcium. On retrouve ce même principe d'échange d'ions (Fluorure – carbonate) dans le cas de l'hydroxy apatite qui peut être obtenu à partir des os de bétail ou par voie synthétique.

Les os de bétail calcinés ont été mis au point en Thaïlande pour une défluoruration des eaux de consommation à l'échelle familiale. L'appareil est constitué d'un tube en PVC (75 cm de long et 9 cm de diamètre muni d'un robinet sur sa partie inférieure et d'un trou au sommet pour la recirculation de l'eau. De bas en haut on note une couche de charbon actif d'environ 300 grammes pour éliminer les odeurs, une couche de 1000 grammes d'os calcinés dans un four à 600°C pendant 20 minutes et une couche de 200 grammes de cailloux environ pour éviter le flottement. Avec un débit de 4 L/h, la teneur en fluorure d'un volume de 480 litres d'eau de boisson passe de 5 mg/L en fluorure à 1 mg/L. La durée de vie de telles installations à l'échelle familiale est de l'ordre de 3 mois.

A l'échelle industrielle, les os calcinés sont remplacés par des phosphates synthétiques qui sont des mélanges d'acide phosphorique et de chaux. Ce produit synthétique se présente sous forme de poudre ou de granules. La forme granulaire fonctionne mieux que la poudre. La teneur initiale en fluor n'influe pas sur la capacité de fixation, qui diminue cependant lorsque la dureté de l'eau augmente. Le pH est compris entre 6,5 et 8 et ce matériau peut être régénéré à la soude à 1% suivi d'un rinçage à l'acide chloridrique 0,7%. On trouve un re-largage souvent important de phosphates dans l'eau traitée. Une unité industrielle appliquant cette méthode et basée à Britton (Dakota, USA) a changé de matériau de filtration au bout de 4 ans de fonctionnement (la cendre d'os a remplacé le phosphate tricalcique synthétique) à cause des pertes excessives de matériau allant jusqu'à 52% par an.

Résines échangeuses d'ions

Il n'existe actuellement pas à notre connaissance de résine spécifique aux ions fluorures. Les résines anioniques fortes disponibles sur le marché mondial ne présentent qu'une faible capacité de fixation vis à vis des ions fluorure. Leur coût élevé les rend inadaptées pour ce genre d'étude.

II-2 PROCÉDÉS PHYSICO-CHIMIQUES OU À MEMBRANES

Ces procédés ont l'avantage de pouvoir se passer de réactifs chimiques et d'une étape de régénération. L'application industrielle des techniques à membrane dans ce domaine dépendra en grande partie de leur sélectivité pour les ions fluorure et de la consommation énergétique afin de les rendre économiquement compétitifs.

Electrodialyse

C'est une technique séparative dans laquelle des sels dissous sont transportés à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique. Lorsqu'une solution est envoyée dans les compartiments séparant ces membranes, les cations migrent vers la cathode en traversant des membranes cationiques et les anions vers l'anode en traversant des membranes anioniques. Grâce à une disposition alternée des membranes échangeuse d'anions et de cations, les ions capables de traverser les membranes de type cationique sont arrêtés par les membranes de types anionique et réciproquement. La concentration dans les compartiments de même parité augmente alors (concentrat) et celle des compartiments adjacents diminue (diluât). L'électrodialyse est une technique qui permet

une élimination du fluor afin que le produit réponde aux normes prescrites par l'ISN ou l'OMS. Cependant elle est inadaptée aux eaux saumâtres (salinité >1 g/L) et n'assure pas une désinfection de l'eau à traiter. L'effet Donnan en dialyse permet aussi, à faible débit, une bonne rétention des ions fluorure. La compétition avec les autres anions reste un inconvénient majeur.

Osmose inverse

La sélectivité des membranes d'osmose inverse est d'origine physico - chimique, basée essentiellement sur le mécanisme de solubilisation – diffusion pour le transfert de solutés. Ce mécanisme d'élimination ionique dépend donc de l'interaction entre la membrane et les ions présents dans l'eau. Ce sont des membranes de type dense permettant de travailler entre 8 et 100 bars (coût énergétique élevé). L'osmose inverse est une technique très efficace pour éliminer la quasi totalité des sels minéraux présents en solution (pas de sélectivité entre les sels), ce qui justifie son utilisation sur plusieurs installations mondiales de dessalement. Pour les besoins d'une eau de boisson, il faut reminéraliser par la suite (sans fluor) pour qu'elle puisse être considérée comme potable. La phase de pré-traitement (clarification) généralement très importante peut atteindre 60% du coût du traitement global.

Ainsi, l'osmose inverse, malgré son avantage d'être simple, compact et pouvant fonctionner en continu, présente un coût d'investissement et de fonctionnement élevé en plus des inconvénients comme la reminéralisation et la forte sensibilité vis à vis des solutions oxydantes.

Nanofiltration

Les membranes sont de type microporeuse permettant des pressions ne dépassant pas 20 bars. La nanofiltration n'est pas à proprement parlé une nouvelle technique, mais son domaine d'application, compris entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration, est particulièrement étudiée depuis quelques années. La sélectivité est à la fois d'origine physique (convection) et chimique (solubilisation–diffusion)[21]. Sous certaines conditions la nanofiltration permet non seulement une décontamination bactérienne totale, mais aussi d'éliminer préférentiellement les ions fluorures [22-24] et de garder une minéralisation suffisante à l'eau (adoucissement partiel) pour qu'elle soit directement potable et ceci à un coût inférieur à celui de l'osmose inverse.

III - CHOIX DU PROCÉDÉ

Les réactions de précipitation ou de co précipitation ont montré leurs limites de performance à cause des quantités importantes de produits chimiques ayant une incidence sur le coût du traitement sans compter la production de boues engendrées.

La filtration sur alumine activée semble la plus répandue car étant l'un des rares procédés à assurer une élimination spécifique des fluorures, même à concentration élevée, en plus de la possibilité

de régénération du matériau. Par ailleurs ce procédé paraît inadapté pour traiter à la fois l'excès de fluor et de salinité.

L'osmose inverse ne peut répondre à cette question à cause de l'élimination quasi totale des sels minéraux et nécessitant une re-minéralisation afin de revenir dans les normes d'eau potable. Son coût peut être revu à la baisse dans le cas d'un mitigeage, c'est à dire le mélange de la solution traitée et de celle à traiter dans des proportions définies, et améliorer sa compétitivité vis à vis de la nanofiltration.

La nanofiltration apparaît finalement comme l'unique procédé qui permet à la fois un abattement suffisant en ions fluorure et également une déminéralisation partielle des eaux à caractère saumâtre. Ce qui justifie, en dehors des considérations de coût, le choix du procédé de nanofiltration pour le traitement des eaux saumâtres et l'étude des conditions optimales tenant compte des caractéristiques de l'eau à traiter.

IV - Étude de cas :

Ces expériences concernent exclusivement des eaux de robinet qui présentent des concentrations en ions fluorure supérieure aux recommandations de l'OMS. Différentes filtrations ont été réalisées à une pression de 5,3 bars et une vitesse de 0,22 m.s⁻¹ à l'aide d'un module de nanofiltration semi-ouvert avec différents types de membranes afin d'observer l'effet de la variation du facteur de concentration volumique sur la rétention des ions fluorure. Ces résultats regroupés dans les tableaux ci-dessous permettent aussi d'observer l'évolution de la dureté et de la concentration des ions chlorure et fluorure.

A titre comparatif, nous pouvons noter les performances des différentes membranes à facteur de concentration volumique constant (FCV ≈ 4) par le passage d'eaux saumâtres.

Avant traitement : eau brute

Ville	<i>Thiadiaye</i>	<i>Gossas</i>	<i>Diourbel</i>	<i>Fatick</i>	<i>Kaolack</i>
F ⁻ (mg/L)	4,45	2,53	2,72	2,6	3,59
Cl ⁻ (mg/L)	291	444	494	672	403
TH (°F)	34,0	3,4	35,5	3,0	2,8

Après traitement :

Ville	<i>Thiadiaye</i>	<i>Gossas</i>	<i>Diourbel</i>	<i>Fatick</i>	<i>Kaolack</i>
Membrane	NF 90	NF200	NF270	NF270	ESPA3
Flux perméat (L.h ⁻¹ .m ⁻²)	44,42	48,57	99,35	98,05	45,22
F ⁻ (mg/L)	0,52	0,70*	1,25*	1,10	0,04
Cl ⁻ (mg/L)	84,36	261,66	384,14	569,14	26,15
TH (°F)	1,73	0,83	10,95	-	-

*FCV = 4,5

Tableaux 2 : Comparaison de performance à FCV constant (eau du Sénégal)

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 [25].

V – CONCLUSION

Dans le contexte d'un développement durable en Afrique, la nanofiltration peut être considérée comme l'une des techniques la mieux adaptée pour un traitement à long terme des eaux de boisson à la fois saumâtres et fluorées. Afin de faire face à l'un des inconvénients majeurs de cette technique tel que le colmatage, un pré-traitement à l'aide de filtres à sable s'avère nécessaire. Le coût d'investissement de la nanofiltration reste suffisamment élevé pour les pays à ressource limitée; mais compte tenu de la quantité et de la qualité de l'eau produite, le prix de revient au mètre cube n'est pas nécessairement plus élevé que dans le cas des méthodes classiques. Le coût d'investissement total d'un pilote de nanofiltration installé en Indonésie est de 2.920.000 dollars US avec une durée de vie estimée à 10 ans pour une production de 8.616.960m³/an d'eau traitée et un prix de revient total de 0,03 dollars US par mètre cube [26].

L'étude sur le devenir du concentrat et l'utilisation de membranes à base d'argile constituent des perspectives de recherche prometteuse pour une solution durable.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Viland, A. Montiel, Guide pratique pour les intervenants en milieu rural africain, Eau et Santé, Programme Solidarité Eau, *Editions du Gret*, France, mars 2001.
- [2] *Jeune Afrique Economie*, n^o 349, avril 2003.
- [3] Triller M., in “Sources-thérapeutiques du fluor”, Fluor et prévention de la carie dentaire *Editions Masson*, Paris (1991) 3
- [4] C. K. Diawara, S. M. Lo, M. Rumeau, M. Pontié, O.Sarr, *J. Memb. Sci.*, 219 (2003)
- [5] A. S. Behrman, H. Gustafson, *Ind. Eng. Chem.*, 30, 9 (1938) 1011-
- [6] T. A. Raoul, J. Toury, J. Perellon, A. Raba, P. Luven, R. Giorgi, *Bull. Med. AOF*, 2 (1957) 357-
- [7] La supplémentation systématique en fluor chez l’enfant doit être remise en question, *LA REVUE PRESCRIRE*, 16 (1996) 162, 381-
- [8] arrêté interministériel du 31 octobre 1985 relatif à la fluoration du sel paru au *journal officiel du 28 novembre 1985, France*.
- [9] M.H. Sy, P. Sène, M.M. Diouf, S. Diouf, *Société d’Edition de l’association d’enseignement médical des hôpitaux de Paris*, 15, 2 (1996) 109-
- [10] Marc Laimé, Pénurie Pollution Corruption, Dossier de l’eau, *Édition du Seuil*, ISBN 2-02-054814-3, mars 2003.
- [11] C. S. Boruff, *Ind. Engng. Chem.*, 26 (1934), 1, 69-
- [12] C. A. Kempf, D. A. Greenwood, V. E. Nelson, *J. Iowa Acad. Sci.*, 41, (1934).153-
- [13] R. L.Culp, H. A. Stoltenberg, *Jawwa*, 50, (1958) 423 –
- [14] Y. Travy, Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal, Sciences géologiques, Mem. 95(1993) *ISSN 0302-2684*.
- [15] I. Ndao, A. Lagaude, Y. Travy, *Sci. et Tech. de L'eau* 26, 3,(1992) 243–
- [16] Z. Qianjie, L. Hanwen, *Environment International*, 18, 3 (1992) 307-
- [17] P. Mazounie, P. Mouchet, *Revue Française des Sciences de l’Eau*, 3 (1984) 29-
- [18] J. P. Belle, C. Jersale, *T.S.M. l’eau*, 2, 79 (1984) 87-
- [19] J. Sibony, *T. S. M. l’eau*, (mars 1983) 66-
- [20] Y. Xu, A. Ning and J. Zhao, *Journal of Colloid and Interface Science*, 235 (2001) 66-
- [21] A. DIASSE-SARR, H. ESSIS-TOME, C. K. DIAWARA *Desalination (2004) 393*.
- [22] A. Lhassani, M. Rumeau, D. Benjelloun, M. Pontié, *Wat. Res.*, 35, 13 (2001) 3264.
- [23] M. Pontie, C. K. Diawara, M. Rumeau, *Desalination* 151 (2002) 267.
- [24] J. P. De witte, *l’Eau l’Industrie et les Nuisances*, 189 (1996) 28.
- [25] [76] C. K. Diawara, J. C. Schrotter, M. Pontié, H. Buisson, *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 89 (2003) 104
- [26] Agust Khalik, V. S. Praptowidodo, *Desalination*, 132 (2000) 287.