

2 5 7

8 8 D E

Défluoruration des eaux souterraines au Sénégal Travaux préliminaires sur l'eau du forage de Fatick

A. LAGAUE (*)

C. KIRSCHÉ (*)

Y. TRAVI (**)

1 — Introduction

La présence de fortes teneurs en fluorures dans les eaux souterraines du bassin sénégalo-mauritanien est connue depuis plusieurs années. Toute la zone comprise entre 15°30' et 17° de longitude et s'étendant entre les fleuves Sénégal et Saloum est susceptible de donner des eaux dont la teneur en fluorures dépasse 1 mg.l⁻¹. Ces fortes concentrations sont associées à la présence de sédiments phosphatés qui apparaissent dès la fin du Crétacé et se développent à l'Eocène [TRAVI Y., LECOUSTOUR E., 1982].

Les formations aquifères concernées par le problème du fluor appartiennent donc à l'Eocène inférieur et moyen, au Paléocène et au Maastrichtien. Les eaux de l'Eocène moyen et de l'Eocène inférieur présentent des teneurs assez irrégulières pouvant atteindre 8 mg.l⁻¹; les eaux issues du Paléocène contiennent des quantités exceptionnellement fortes en fluorures (jusqu'à 12 mg.l⁻¹); les eaux du Maastrichtien semblent affectées de manière plus homogène (1 à 3 mg.l⁻¹) dans tout le secteur considéré avec des teneurs maximales (4 à 6 mg.l⁻¹) autour des villes de Diourbel et Kaolack. A ces concentrations, le fluor est responsable d'intoxications chroniques se traduisant principalement par une action pathogène au niveau des systèmes osseux et dentaire.

Les nappes chargées en fluor constituent souvent la seule possibilité d'approvisionnement en eau; un trai-

tement susceptible d'abaisser les teneurs en fluor de ces eaux à une teneur voisine de 1 mg.l⁻¹ s'avère donc nécessaire.

Le travail présenté dans cet article a trait au choix d'une méthode de défluoruration et à son optimisation. Cette méthode doit être adaptée aux contraintes économiques et sociales d'un pays en voie de développement et à un réseau de distribution peu étendu.

Pour les essais préliminaires, les eaux du forage de Fatick (figure 1) ont été utilisées. Ce forage, exploité par la Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal (SONEES), capte l'aquifère paléocène à 160 mètres de profondeur.

2 — Recherche d'un agent de défluoruration

Les procédés qui font appel à une filtration sur un matériau réagissant avec le fluor par un processus d'échange d'ions [BARBIER J.-B., MAZOUNIE P., 1984, BHAKUNI T.-S., SASTRY C.-A., 1964, SCHOEMAN J.-J., BOTHA G.-R., 1985], ont été écartés en raison du coût des installations, des problèmes liés à la conduite du procédé et de la nécessité d'avoir du personnel qualifié. L'utilisation au Sénégal de phosphate d'alumine

(*) Ecole Nationale Supérieure Universitaire de Technologie. B.P. 5085, Dakar (Sénégal).

(**) Département de Géologie. Faculté des Sciences. 33, rue Louis Pasteur, 84000 Avignon.

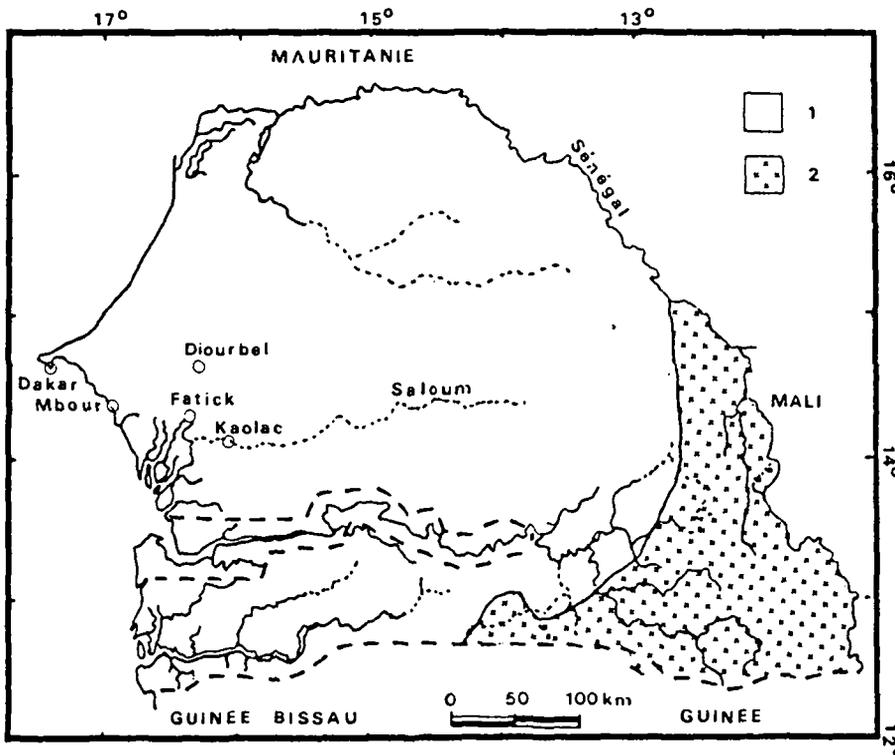


Fig. 1 : Carte du bassin sénégalo-mauritanien.

- 1 : bassin sédimentaire
- 2 : socle cristallophylien.

257.5732

issu de gisements locaux a été envisagée puis abandonnée en raison des variations de la capacité d'adsorption du phosphate entraînant des fluctuations considérables sur la défluoruration de l'eau potable (I.G.I.P., 1982).

Les réactions de précipitation constituent une deuxième possibilité. Des traitements de ce type mettant en jeu différents composés ont été réalisés avec succès [MAZOUNIE P., MOUCHET P., NAWLAKHE W.-G. et al., 1975 ; VISWANNADHAM C.-R. et al., 1974]. Le choix de l'un de ces composés ne peut être fait qu'après avoir déterminé la composition chimique de l'eau et effectué des essais préliminaires sur l'eau à traiter. Une fois l'agent précipitant retenu, il convient de définir les conditions optimales du traitement : concentration en réactif, pH de l'eau, dispersion du réactif dans l'eau, temps de repos, mode de séparation du précipité.

2.1 — Caractéristiques chimiques de l'eau du forage de Fatick

L'eau du forage de Fatick est de type chloruré sodique avec une teneur totale en composés dissous (total dissolved solids : T.D.S.) de l'ordre de $1,9 \text{ g.l}^{-1}$ (Tableau I). En outre les calculs d'équilibre ont montré qu'elle était saturée ou très proche de la saturation vis-à-vis de la calcite, la magnésite, la dolomite et la fluorine.

Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻⁻	SO ₄ ⁻⁻	F ⁻	H ₄ SiO ₄
612	20	3,6	3,3	555	615	6	61	5,2	2,5

Tableau I : Concentration (mg.l^{-1}) des principaux éléments contenus dans l'eau du forage de Fatick.

2.2 — Résultats expérimentaux

Les essais sont réalisés sur 200 ml d'eau de Fatick. Le réactif défluorant testé est introduit sous forme solide à raison de 1 g.l^{-1} . Après quinze minutes d'agitation mécanique et trente minutes de repos, l'eau est filtrée sur papier Whatman. Le fluor résiduel est alors mesuré à l'aide d'une électrode spécifique Ingold.

L'élimination du fluor par précipitation du fluorure de calcium après ajout à l'eau de calcium sous forme de chaux, de carbonate de calcium ou de nitrate de calcium est peu importante puisque la teneur en fluor résiduel est de l'ordre de $5,0 \text{ mg.l}^{-1}$. Ce mauvais résultat est logique compte tenu de l'état de saturation de l'eau vis-à-vis de la calcite.

Le traitement avec 1 mg.l^{-1} d'oxyde de magnésium suivi d'une opération d'adoucissement avec $5,0 \text{ g.l}^{-1}$ de chaux permettent d'obtenir $0,65 \text{ mg.l}^{-1}$ de fluor résiduel mais ce résultat intéressant est contrebalancé par les manipulations supplémentaires et un pH final supérieur à 10. La possibilité d'utiliser cette technique n'a pas été retenue.

L'emploi de sels d'aluminium comme agents défluorants aboutit à des résultats variables. Dans les conditions expérimentales décrites précédemment, l'oxyde d'aluminium n'a aucun effet, le sulfate d'aluminium et de potassium (alun de potassium ainsi que le sulfate d'ammonium et d'aluminium (alun d'ammonium) donnent respectivement une concentration en fluor résiduel de 2,9 et $2,5 \text{ mg.l}^{-1}$. Le sulfate d'aluminium permet d'atteindre $0,9 \text{ mg.l}^{-1}$ de même que le nitrate d'aluminium. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'acétate d'aluminium (fluor résiduel $0,8 \text{ mg.l}^{-1}$) et le chlorure d'aluminium (fluor résiduel $0,6 \text{ mg.l}^{-1}$).

Parmi les réactifs testés, seuls les sels d'aluminium présentent un intérêt pratique. Le sulfate d'aluminium, bien qu'il ne soit pas le plus performant, nous paraît le mieux adapté en raison de son prix et de son usage courant dans les processus de traitement des eaux. Les aluns sont préconisés en Inde pour la défluoruration des eaux [NAWLAKHE W.-G. et al., 1975] mais ils se révèlent, dans le cas présent, nettement moins intéressants.

3 — Défluoruration à l'aide du sulfate d'aluminium

3.1 — Optimisation de la méthode expérimentale

Le sulfate d'aluminium est ajouté sous forme de solution à 5 % à 200 ml d'eau. Le mélange s'effectue à l'aide d'un agitateur à pales et à vitesse variable. La séparation du fluor insolubilisé se fait par filtration sur papier.

La rapidité du processus d'insolubilisation du fluor par l'aluminium est telle qu'une agitation lente, maintenue pendant une courte durée, est suffisante. Une vitesse d'agitation de 480 tours par minute pendant dix secondes permet l'insolubilisation de 90 % des fluorures. Une agitation lente est préférable ; en effet, l'augmentation de la vitesse d'agitation de 10 à 1 000 tours par minute provoque une légère diminution de l'efficacité du traitement si l'opération est maintenue plus de 2 minutes.

Les teneurs en fluor résiduel ne sont pas modifiées lorsque le temps de repos avant filtration passe de 1 à 15 minutes. Toutefois ce facteur intervient sur la dimension des particules en suspension et par suite il devra être pris en considération si une décantation est prévue.

L'addition de sulfate d'aluminium à l'eau se traduit par une diminution concomitante du pH. L'effet de l'acidification vient se superposer à l'effet du réactif défluorant. Les courbes représentées sur la figure 2 montrent les variations de la teneur en fluor résiduel en fonction du pH et de la concentration en sulfate d'aluminium. Aux trois concentrations testées, nous pouvons observer un optimum correspondant au pH 6,2 alors que les pH de l'eau en présence de 5,0-0,7-1,0 mg.l^{-1} de sulfate d'aluminium sont normalement de 6,5-6,3-5,8. Une concentration en sulfate d'aluminium de $0,75 \text{ mg.l}^{-1}$ permet d'obtenir directement le pH optimum de 6,2 et une teneur en fluor résiduel inférieure à 1 mg.l^{-1} .

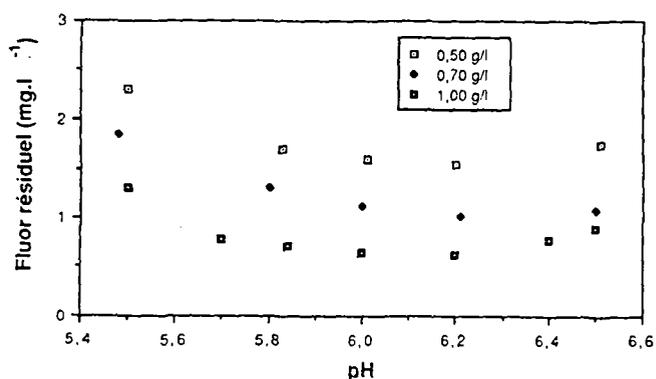


Fig. 2 : Effet de la concentration en sulfate d'aluminium ($0,50 \text{ g.l}^{-1}$; $0,70 \text{ g.l}^{-1}$; 1 g.l^{-1}) sur le fluor résiduel lorsque le pH est imposé.

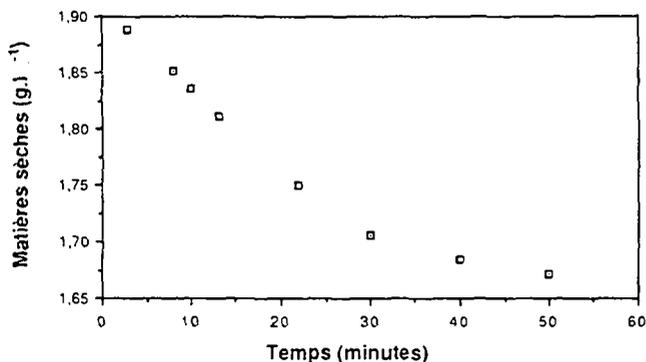


Fig. 3 : Evolution de la décantation après un traitement à 0,75 g.l⁻¹ de sulfate d'aluminium.

3.2 — Elimination des composés insolubilisés

L'élimination des composés insolubilisés peut être envisagée par décantation, par filtration ou par une association des deux méthodes.

Les expériences de décantation sont réalisées dans une éprouvette de un litre en position verticale. La clarification de l'eau traitée avec 0,75 mg.l⁻¹ de sulfate d'aluminium est suivie à partir de la matière sèche de l'eau prélevée à mi-hauteur de l'éprouvette (figure 3).

La floculation se manifeste dans les 10 minutes qui suivent l'introduction du réactif. Après 30 minutes de repos, le surnageant est clair. La mesure de la densité optique d'un échantillon prélevé dans la partie inférieure de la colonne d'eau (1/5 de la hauteur) montre que la clarification de la solution est homogène. Le pH de l'eau traitée est de 6,4 et la teneur en fluor résiduel de 0,97 mg.l⁻¹. Après 30 minutes de décantation, 76 % de la matière sèche contenue dans l'eau traitée est éliminée si l'on prend comme référence la matière sèche trouvée dans le surnageant après une nuit de repos. Le dépôt accumulé au fond de l'éprouvette occupe 50 ml après une heure de décantation, soit un-vingtième du volume d'eau traitée. Après une nuit de repos, ce volume es ramené à 30 ml. Les essais de décantation montrent que la majorité des matières insolubles peuvent être éliminées en une demi-heure.

Il est possible d'envisager une filtration à la suite ou à la place de la décantation. Pour tester divers matériaux filtrants, on utilise une colonne de 2 cm de diamètre avec une couche filtrante de 10 cm d'épaisseur. La hauteur de la colonne d'eau située au-dessus du lit filtrant est de 50 cm. Elle est maintenue constante grâce à un trop-plein. Les essais se font sur 200 ml d'eau. Les mesures du fluor et du pH, effectuées après filtration sur les différents matériaux, sont regroupées dans le tableau II.

Matériaux	Fluor (mg.l ⁻¹)	pH
Papier filtre	1,10	6,55
Latérite	2,25	6,85
Tourbe	0,98	3,75
Sable	0,68	6,55
Charbon de bois	0,55	7,50

Tableau II : Effets de différents matériaux filtrants sur la teneur en fluor et sur le pH de l'eau traitée.

Le charbon de bois et le sable donnent les meilleurs résultats. Ces deux produits permettent une amélioration sensible de la défluoruration par rapport à la filtration sur papier Whatman réalisée lors de l'étude des agents de défluoruration.

Seul le sable a été retenu pour les expériences ultérieures. Son faible coût et sa disponibilité compensent largement ses performances légèrement inférieures à celles du charbon de bois. La filtration de l'eau non décantée sur une couche de 10 cm de sable aboutit rapidement à un colmatage même si une pression de 0,4 bar est appliquée (débit inférieur à 0,5 m³/h/m² après 30 minutes de filtration). La filtration sur 7,5 cm de sable et sous une pression de 0,3 bar de l'eau préalablement décantée permet d'associer une capacité de filtration importante et l'obtention d'une eau parfaitement limpide (figure 4).

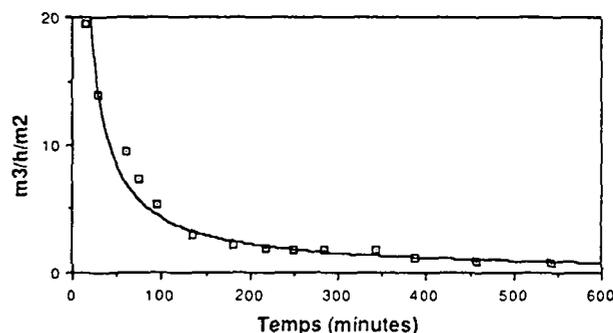


Fig. 4 : Débit d'eau traitée rapporté au mètre carré de surface filtrante en fonction du temps.

3.3 — Qualité de l'eau traitée

Au cours du traitement au sulfate d'aluminium, la composition chimique de l'eau subit d'importantes modifications. Ces changements sont susceptibles d'altérer sa qualité et il convient de s'assurer que l'eau traitée répond toujours aux normes de potabilité. Les résultats des analyses effectuées sont rassemblés dans le tableau III.

Mesures	Eau brute	Eau décantée	Eau filtrée
pH	8,50	6,22	6,40
Turbidité (NTU)	0,7	2,0	0,2
T _A (CaCO ₃ mg.l ⁻¹)	16	0	0
T _{AC} (CaCO ₃ mg.l ⁻¹)	521	210	210
T _H (CaCO ₃ mg.l ⁻¹)	31	32	30
Aluminium (mg.l ⁻¹)	0,05	0,18	0,15
Sulfates (mg.l ⁻¹)	42	300	320

Tableau III : Analyse chimique de l'eau aux différents stades du traitement.

La turbidité de l'eau filtrée, exprimée en unité néphélométrique (NTU), est inférieure à celle de l'eau brute. L'incorporation de sulfate d'aluminium à l'eau de Fatick provoque une diminution sensible du pH qui s'accompagne d'une chute du titre alcalimétrique

complet (TAC) et de l'annulation du titre alcalimétrique (TA). Le titre hydrotimétrique (TH) ne subit pas de variations sensibles.

Les teneurs en sulfate et en aluminium en solution après le traitement sont élevées ; toutefois elles restent acceptables. L'aluminium présente une teneur résiduelle inférieure à la concentration maximale admissible (0,20 mg.l⁻¹) que ce soit après la décantation (0,18 mg.l⁻¹) ou la filtration (0,15 mg.l⁻¹).

4 — Conclusion

Le traitement de l'eau de Fatick par 0,75 g.l⁻¹ de sulfate d'aluminium permet d'obtenir un eau renfermant moins de 1 mg.l⁻¹ de fluor. La majeure partie des matières insolubles peut être éliminée par décantation. La composition chimique de l'eau traitée respecte les normes de potabilité et la technique est suffisamment simple pour être utilisée tant au niveau domestique que dans une installation desservant une agglomération.

L'eau du forage de Fatick est particulièrement chargée en fluor. Les eaux fluorurées utilisées à des fins alimentaires au Sénégal ont plus souvent une teneur en fluor voisine de 3 mg.l⁻¹. Le traitement d'une eau de ce type nécessiterait environ 0,25 g.l⁻¹ de sulfate d'aluminium, ce qui implique une charge minérale de l'eau traitée sensiblement plus faible et un coût de traitement moins élevé. Il est certain que la teneur optimale en sulfate d'aluminium doit être déterminée et les conditions d'élimination des composés insolubles vérifiées pour chaque type d'eau. Cette étude complémentaire est en cours et devrait permettre d'évaluer les possibilités d'implantation de la technique auprès des populations concernées.

Remerciements

La Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal (SONEES) est remercié pour l'aide et le financement qu'elle a accordés pour cette étude.

Bibliographie

BARBIER J.-B. et MAZOUNIÉ P. (1984). « Methods of reducing high fluoride content in drinking water. Fluoride removal methods-filtration through activated alumina : a recommended technique ». *Water Supply*, vol. 2 ; p. SS8/1 SS8/9.

BHAKUNI T.-S. and SASTRY C.-A. (1964). « Defluoridation of water using cation exchangers treated with aluminium sulphate solution ». *Environmental Health*, Vol. VI, p. 246-250.

I.G.I.P. 1982. « Rapport sur les essais de défluoruration avec la station pilote à Bambey ». Martin Buber Str. 50. D-6100 Darmstadt, 10 p., inédit.

MAZOUNIÉ P. et MOUCHET P. (1984). « Procédés d'élimination du fluor dans les eaux alimentaires ». *Revue française des Sciences de l'Eau* ; vol. 3 (1) p. 29-51.

NAWLAKHE W.-G., KULKARNI D.-N., PATHAK B.-N., BULUSU K.-R. (1975). « Defluoridation of water by Nalgonda technique ». *Indian J. Environ. HLTH*. Vol. 17, n°1, p. 26-65.

SCHOEMAN J.-J., BOTHA G.R. (1985). « An evaluation of the activated alumina process for fluoride removal from drinking water and some factors influencing its performance ». *Water S.A.* vol. 11 (1), p. 25-31.

TRAVI Y. et LE COUSTOUR E. (1982). « Fluoroses dentaires et eaux souterraines : l'exemple du Sénégal ». *Eau du Québec*, vol. 15, n° 1, p. 9-12.

VISWANADHAM C.-R., PURUSHOTTAM D., RAO G.-R., VAI-DYANADHAM D., FRANCIS P.-G. (1974). « Defluoridation of water with magnesium oxide ». *Proceedings of the Symposium on fluorosis paper 26*, p. 249-272.

Résumé

A. LAGAUE, C. KIRSCHÉ, Y. TRAVI : Défluoruration des eaux souterraines au Sénégal. Travaux préliminaires sur l'eau du forage de Fatick.

Au Sénégal, l'utilisation, à des fins alimentaires, des eaux souterraines riches en fluorures nécessite la mise en place d'unités de défluoruration. L'insolubilisation des fluorures par le sulfate d'aluminium suivie d'une décantation et d'une filtration est proposée en raison de sa facilité de mise en œuvre et de son efficacité dans le cas des eaux de Fatick. Une concentration de 0,75 mg.l⁻¹ de sulfate d'aluminium permet d'abaisser la teneur en fluorures de 6 à 1 mg.l⁻¹ sans correction de pH. Les fluorures ainsi insolubilisés se prêtent bien à une séparation par décantation.

Summary

A. LAGAUE, C. KIRSCHÉ, Y. TRAVI : Defluoruration of ground waters in Senegal : preliminary work in the case of Fatick waters.

Water supply from ground waters with high fluorides content in Senegal needs the installation of defluoruration units for human uses. Precipitation of fluorides by aluminium sulfate followed by decantation and filtration seems to be the appropriate process because of its practical application and its efficiency in the case of Fatick waters. 0,75 mg.l⁻¹ concentration of aluminium sulfate allows to decrease fluorides concentration from 6 to 1 mg.l⁻¹. Then precipitated fluorides are easily separated by decantation.