

DEFLUORURATION DES EAUX SOUTERRAINES DU SUD ALGERIEN PAR LA CHAUX ET LE SULFATE D'ALUMINIUM

YOUCEF, LEÏLA*, ACHOUR, SAMIA**

(*) Institut Agropastoral, Centre Universitaire Ziane Achour – Djelfa, Algérie
(**) Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de surface (LARHYSS) –
Université Mohamed Khider, B.P. 145, 07000, Biskra, Algérie

ABSTRACT

In the south of Algeria, according to some epidemiological investigations, a problem of health known under the name of endemic fluorosis puts extensively in the oriental zone. It emanates essentially of the ingestion of the excessive quantities of fluoride by the slant of the drinking water.

Face to the rarefaction of the resources in alimentary waters of good quality, the treatment of the waters with a great content of fluoride will becomes a necessity of more in addition.

In this objective, our choice is carried on the chemical precipitation by lime and the coagulation-flocculation by aluminium sulphate in reason of their efficiency and of the simplicity of their stake in work.

This work was achieved on the water of four wells of the south of Algeria. The experimentation aimed to define the quantities of lime and aluminium sulphate to put in work in function of the vestigial content of the water in fluoride, then to control the quality of the water treated by the two products.

Finally, a comparison between the results obtained by the two processes allowed us to conclude that the defluoridation by chemical precipitation by lime is the process of choice for many waters of northern Sahara.

RESUME

Dans le sud algérien, selon quelques enquêtes épidémiologiques, un problème de santé connu sous le nom de fluorose endémique se pose largement dans la zone orientale. Il découle essentiellement de l'ingestion de quantités excessives de fluor par le biais de l'eau de boisson. Face à la raréfaction des ressources en eaux alimentaires de bonne qualité, le traitement des eaux fluorées deviendra de plus en plus une nécessité.

Dans cet objectif, notre choix s'est porté sur la précipitation chimique à la chaux et la coagulation-flocculation au sulfate d'aluminium en raison de leur efficacité et de la simplicité de leur mise en œuvre.

Ce travail a été réalisé sur l'eau de quatre forages du sud algérien. L'expérimentation visait à définir les quantités de chaux à mettre en œuvre en fonction de la teneur résiduelle de l'eau en fluor, puis à contrôler la qualité de l'eau traitée par les deux produits.

Enfin, une comparaison entre les résultats obtenus par les deux procédés nous a permis de conclure que la défluoruration par précipitation chimique à la chaux est le procédé de choix pour la plupart des eaux du Sahara septentrional.

1. INTRODUCTION

Les teneurs en fluorures rencontrées dans les principaux aquifères (CT : complexe terminal, CI : continental intercalaire) du Sahara septentrional en Algérie dépassent fréquemment les normes de l'O.M.S. (1972), et peuvent atteindre en majorité 3 mg/l (Tableau 1). Ceci est à l'origine de troubles lésionnels ou fonctionnels atteignant en particulier le système ostéo-dentaire (fluorose endémique) (Azout et Abraham, 1978), surtout dans la zone orientale du Sahara septentrional.

Certaines eaux ne dépassent que légèrement les

normes internationales. Cependant, ces eaux constituent la seule source d'approvisionnement en eau potable et le climat chaud et sec oblige les habitants à consommer beaucoup d'eau et donc à élever le taux de fluor absorbé quotidiennement. Il s'y ajoute certainement un apport fluoré par une consommation abondante de dattes et de thé. De ce fait, le traitement des eaux fluorées devient indispensable. Notons qu'en Algérie il n'y a aucune station prévue à cet effet.

Toutes ces eaux se caractérisent par une dureté excessive due principalement aux taux élevées en calcium et magnésium, de fortes teneurs en chlorures, sulfates et sodium (Achour, 1990).

Actuellement, il existe plusieurs techniques d'élimination partielle des fluorures des eaux de consommation mais qui garantissent toutefois un apport en fluorures conforme aux normes, telles que l'adsorption sur lit d'alumine activée (Xu-Guo-Xun, 1992), sur lits de phosphate tricalcique, la coagulation-floculation aux sels d'aluminium ou la précipitation chimique à la chaux (Sorg, 1978, Degrémont, 1978). Ce procédé devient particulièrement intéressant s'il s'agit d'eaux contenant suffisamment de magnésium.

L'adsorption de telle ou telle autre technique reste conditionnée par la qualité physico-chimique de l'eau à traiter, la simplicité du procédé et la situation socio-économique du pays concerné. Confrontés à ces exigences, nous avons axé notre travail sur l'étude et la comparaison du pouvoir défluorant de la chaux et du sulfate d'aluminium vis-à-vis des eaux souterraines du sud algérien. Nous nous sommes également intéressés à leur incidence sur la qualité physico-chimique de ces eaux en fin de traitement. Ces essais permettront également de justifier le choix de la méthode la plus adaptable pour la défluoruration des eaux souterraines de la région d'étude.

REGION	POINT D'EAU	NATURE DE LA NAPPE	F ⁻ (mg/l)
El – Oued	Guemmar	Nappe phréatique (CT)	4,30
	Kourine	Le pontien (CT)	1,73
	Sahane Berry	Albien (CI)	0,80
Ouargla	Forage N'Goussa	Miopliocène (CT)	1,47
	Sokra	Sénonien (CT)	1,50
	Romania El - Bour	Albien (CI)	0,65
Touggourt	Sidi Mahdi	Albien (CI)	1,76
	El - Goug	Miopliocène (CT)	3,08
Biskra	Ouled Djellal n°1	Albien (CI)	0,65
	El – Hadjeb	Nappe phréatique (CT)	2,41
	El – Alia sud	Miopliocène	1,33

Tableau 1: Teneurs en fluor de quelques échantillons d'eaux du sud algérien (Youcef, 1998)

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1 Réactifs utilisés et méthodes de dosage

Les réactifs défluorants utilisés respectivement pour la précipitation et la coagulation-floculation sont :

- La chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à 96% de pureté, la solution mère de chaux est préparée sous forme de lait de chaux (en suspension) en réalisant une suspension à 10 g/l et pour laquelle 1 ml introduit dans un litre d'eau brute représente un taux de traitement de 10 mg/l.
- Le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$), la solution mère de ce réactif est préparée en

faisant dissoudre 10 g du coagulant dans un litre d'eau distillée.

Les analyses des différentes caractéristiques physico-chimiques des eaux que nous avons étudiées ont été effectuées selon les méthodes standard d'évaluation de qualité décrites par Rodier (1984) ou Tardat-Henry (1984) :

- Dureté totale (TH) : méthode complexométrique par titrage à l'EDTA en présence de noir ériochrome T.
- Dosage du calcium : par complexométrie à l'EDTA en présence d'un indicateur coloré (Murexide).

Connaissant la dureté totale d'une part et la dureté calcique d'autre part, on peut calculer la dureté magnésienne par différence. Celle-ci peut être convertie en mg/l.

- Alcalinité : par volumétrie, en titrant par l'acide sulfurique (N/50)
- Dosage des chlorures : par volumétrie, selon la méthode de Mohr.
- Dosage des sulfates : (méthode néphélométrique) par utilisation d'un spectrophotomètre Shimadzu UV 120-01 à une longueur d'onde de 420 nm.
- Conductivité : par utilisation d'un conductimètre (Weilheim LF 90). Les lectures sont données à 25°C en mS/cm ou en $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- pH : nous disposons d'un pH mètre digital de laboratoire (OP 211/1) sur lequel nous avons branché une électrode combinée sensible au pH (HPT/378987).
- Dosage du fluor : par la méthode potentiométrique à l'aide d'une électrode spécifique aux ions F^- (type ISE 944099/1). Lorsque l'on utilise cette méthode, il est d'abord nécessaire de procéder à un étalonnage de l'électrode spécifique. On mesure le potentiel de l'échantillon à analyser de la même manière que pour les étalons. On relève la valeur inconnue de la concentration en fluorure par lecture directe sur la courbe d'étalonnage ou par application de la relation $\text{Potentiel (mV)} = f(\log C)$ où C représente la concentration du fluor (mg/l).

2.2 Essais de défluoruration

Pour l'ensemble des essais d'élimination du fluor réalisés, nous avons utilisé un flocculateur de laboratoire (Floctester / Aqua lytic) constitué d'une série d'agitateurs à palette de $3,5 \times 3,5 \text{ cm}^2$, qui tournent de 10 à 150 tr/min. Ce flocculateur permet de réaliser simultanément quatre essais dans les béchers en plastique de 500 ml.

En réalisant plusieurs essais, nous avons pu fixer les conditions optimales d'agitation en appréciant la vitesse et le temps d'agitation ainsi que le temps de décantation sur l'efficacité de la défluoruration par précipitation chimique à la chaux (Youcef et Achour, 1996). Ainsi, pour la suite de nos essais nous avons opté pour les conditions de défluoruration suivantes :

- Une agitation rapide à 150 tr/min. durant 3 minutes et au début de laquelle les réactifs défluorants sont introduits à doses variables.
- Une agitation lente à 40 tr/min. pendant 17 minutes.
- Un temps de décantation fixé à 30 minutes.

Ces mêmes conditions d'agitation et de décantation ont été considérées pour la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium (Youcef, 1998). L'efficacité du traitement est estimée par la mesure du fluor résiduel et éventuellement le rendement d'élimination du fluor.

2.3 Origine et qualité des eaux utilisées pour l'expérimentation

2.3.1 Origine des eaux testées

D'après quelques études (Achour, 1990; Tabouche, 1999) ainsi que nos propres analyses (Youcef, 1998; Youcef et Achour, 1999), il s'est avéré que les eaux souterraines du complexe terminal du Sahara

septentrional sont les plus chargées en fluor. De ce fait, les quatre eaux testées concernent des forages dans les nappes du complexe terminal. Ces eaux sont naturellement fluorées et sont destinées à l'alimentation en eau potable.

2.3.2 Qualité des eaux testées

Avant d'entamer les essais de défluoruration, nous avons procédé à la détermination des principaux paramètres de qualité de ces eaux, en commençant par l'analyse du fluor. Le tableau 2 regroupe les résultats obtenus. Nous pouvons constater que les teneurs en fluor des différentes eaux sont supérieures à la norme de l'O.M.S. relatives à ces régions (0,6 à 0,8 mg/l).

Concernant les autres paramètres de qualité, nous pouvons constater des conductivités supérieures à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et donc des minéralisations totales dépassant globalement les normes de potabilité. De même, les fortes teneurs en calcium et magnésium se traduisent par une dureté excessive dépassant dans tous les cas 50°F. Toutefois, de telles teneurs en magnésium pourront favoriser une défluoruration efficace lors d'un traitement par précipitation chimique à la chaux.

L'alcalinité des eaux (TAC) est bicarbonatée car le pH est inférieur à 8,3. Cependant, ce TAC est très inférieur à la dureté totale (TH) et indique la présence d'une dureté permanente (TH – TAC) très importante et souvent liée aux chlorures et aux sulfates.

Point d'eau	pH	TAC (°F)	TH (°F)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	Conductivité (mS/cm)
Ede-Meao (Ouragla)	7,66	7,9	104	243	104	1150	683	1,99	2,62
Doucen réservoir (Biskra)	7,39	12,4	214	632	134	1050	1833	2,61	2,86
Chaïba (Biskra)	8,22	13,8	59	133	62	639	370	2,63	1,44
Chott (El-Oued)	7,97	8,5	142	261	184	700	817	2,81	4,37

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux soumises aux essais de défluoruration

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Détermination des doses optimales des réactifs défluorants

L'évolution du fluor résiduel en fonction de doses croissantes de chaux et de sulfate d'aluminium introduites apparaît sur la figure 1.

Au vu de ces résultats, nous pouvons constater que par le biais des deux procédés nous pouvons ramener la teneur initiale en fluor de chaque eau traitée à une teneur très inférieure à 1 mg/l. Toutefois, les doses optimales de chaux (300 à 400 mg/l) ou de sulfate d'aluminium (280 à 560 mg/l) sont élevées et augmentent globalement avec la teneur initiale en fluor des eaux à traiter. Ceci a été d'ailleurs constaté lors

d'une étude antérieure (Youcef, 1998) que nous avons réalisé sur solutions synthétiques de fluorure de sodium ayant des teneurs initiales en fluor entre 1,56 et 6,56 mg/l. De cette dernière étude, nous avons remarqué que pour des concentrations élevées en fluor, atteignant 6,56 mg/l, les deux procédés aboutissent à une teneur en fluor résiduel dépassant largement la limite supérieure recommandée par l'O.M.S., soit 0,8 mg/l. Ce qui nous a amené à suggérer que les deux procédés utilisés seraient efficaces pour des eaux ayant des teneurs faibles ou moyennes en fluor. Ce qui serait le cas de la plupart des eaux de la région du Sahara septentrional dont les teneurs en fluor dépassent rarement 3 mg/l (Tabouche, 1999; Youcef et Achour, 1999).

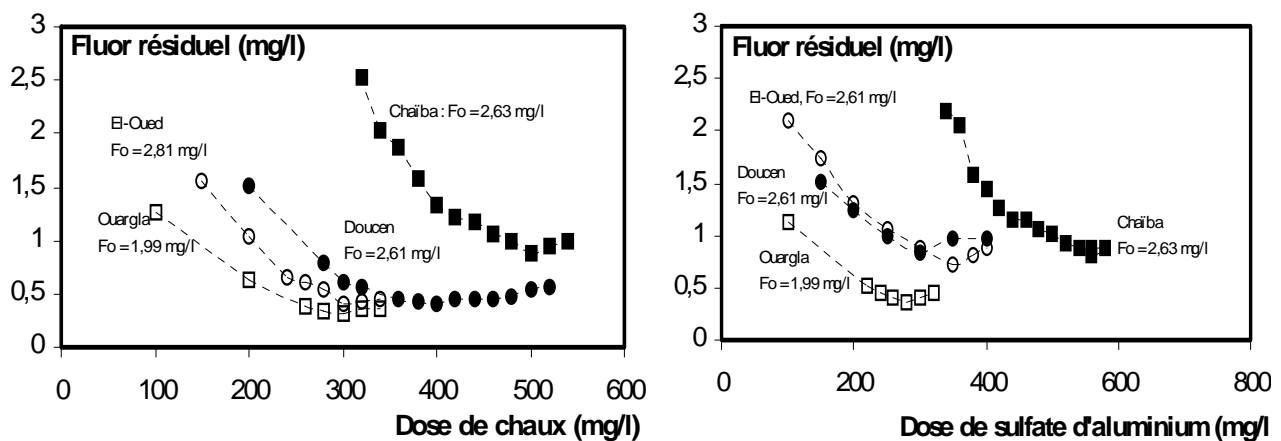
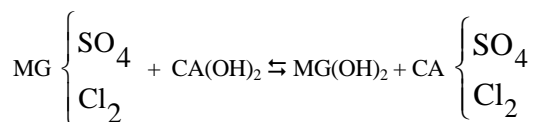
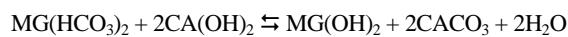


Figure 1 : Evolution du fluor résiduel en fonction de la dose de réactif défluorant

3.1.1 Cas de la précipitation chimique à la chaux

Le phénomène prédominant serait l'adsorption des ions F sur les sites de la magnésie $Mg(OH)_2$ formée grâce à la présence de quantité suffisante de magnésium dans l'eau. Ceci, du fait que les particules de $Mg(OH)_2$ portent une charge d'électricité positive dans l'intervalle total de pH de leur existence. Cette remarque est dérivée d'études électrophorétiques (Brodsky et Zdenek, 1971). Rappelons que les réactions globales de la formation de la magnésie sont les suivantes :



Le pH semble également être un paramètre important pour l'élimination du fluor par adsorption sur la magnésie. En effet, l'introduction de doses croissantes de chaux a pour effet d'augmenter le pH et le pH optimal se situe globalement entre 10 et 11; ce qui permet d'atteindre le pH optimal de précipitation de $Mg(OH)_2$ entre 9,8 et 11,3 (Alexéev, 1970).

En représentant, à titre d'exemple, sur la figure 2 l'évolution du rendement d'élimination du fluor de l'eau du Chott (El-Oued) en fonction de la quantité de magnésium précipité, il paraît évident que les deux phénomènes sont étroitement liés. En effet, nous pouvons constater (de même que pour toutes les eaux testées) que l'augmentation du rendement de défluoruration a lieu en même temps que celle du Mg^{2+}

précipité. Toutefois, un palier apparaît après l'optimum de rendement et correspond probablement à une augmentation de la teneur en hydroxydes libérés par la chaux. Ceux-ci pourraient s'adsorber sur les sites de la magnésie et entrer en compétition avec les ions F. Une ressolubilisation d'une fraction de $Mg(OH)_2$ précipité pourrait également survenir à pH élevé.

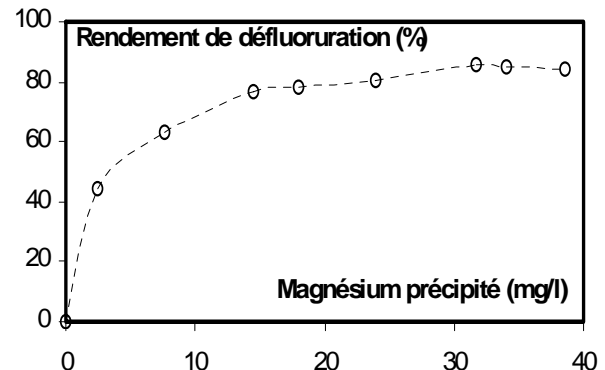


Figure 2 : Variation du rendement de défluoruration de l'eau du Chott (El-Oued) en fonction du magnésium précipité

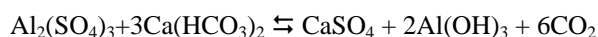
Afin de mettre en évidence le phénomène d'adsorption des fluorures sur la magnésie formée, nous avons procédé à l'étude des isothermes d'adsorption selon les lois de Langmuir et de Freundlich. L'exploitation de nos résultats a pu aboutir à une bonne linéarité des isothermes tracées montrant ainsi que la rétention des ions fluorures à la surface de la magnésie obéit bien aux lois d'adsorption précitées (Tableau 3).

EAUX	LANGMUIR			FREUNDLICH			Rendement défluoruration (%)
	b (l/mg)	q _m (mg/g)	Corrélation (%)	n	k	Corrélation (%)	
Chaïba (Biskra)	0,6	72,80	99,10	0,48	198,70	99,20	66,92
Doucen réservoir (Biskra)	0,6	129,44	98,07	0,55	216,23	99,79	84,29
Ede-Meao (Ouargla)	0,7	119,03	98,66	0,56	235,02	99,88	84,42
Chott (El-Oued)	0,3	168,45	99,42	0,69	252,85	98,43	85,41

Tableau 3 : Paramètres relatifs aux isothermes de Langmuir et de Freundlich au cours de la précipitation chimique

3.1.2 Cas de la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium

Lors de l'hydrolyse du sel d'aluminium dans les solutions à traiter, il se produit un précipité blanc gélatineux $Al(OH)_3$ qui se forme, aux dépens de la dureté temporaire (bicarbonates) qui se trouve transformée en dureté permanente selon la réaction :



Par ailleurs, chaque Al^{3+} peut réagir avec 3 OH^- provenant de l'eau elle-même (réaction d'hydrolyse).

Le phénomène qui pourrait expliquer l'abatement de la teneur initiale en fluor pour chaque eau traitée serait un phénomène d'adsorption. D'après Rabosky (1975), le gel d'hydroxyde d'aluminium formé peut servir de surface de fixation ou d'adsorption des ions F. Ceci se

produirait au cours de la floculation. L'ion fluorure est alors adsorbé dans la couche ionique (couche double) du floculant puis éliminé avec ce dernier pendant la décantation.

Afin de vérifier s'il y a eu phénomène d'adsorption lors du traitement des eaux par ce procédé, nous avons essayé d'exploiter nos résultats selon les isothermes de Langmuir et de Freundlich en admettant que la masse de l'adsorbant (m) est la quantité de Al^{3+} rajoutée à la solution sous forme de $(Al_3(SO_4)_3, 18 H_2O)$. Ainsi, nous avons constaté que la quantité du fluor adsorbé peut être décrite par les deux isothermes, et que la capacité maximale d'adsorption q_m de Langmuir et le coefficient k de Freundlich varient dans le même sens que le rendement optimal de défluoruration (Tableau 4).

EAUX	LANGMUIR			FREUNDLICH			Rendement défluoruration (%)
	b (l/mg)	q _m (mg/g)	Corrélation (%)	n	k	Corrélation (%)	
Chaïba (Biskra)	1,61	129,04	99,62	2,83	79,14	99,38	68,20
Doucen réservoir (Biskra)	1,60	130,30	99,70	2,74	80,28	99,52	68,82
Ede-Meao (Ouargla)	1,64	136,16	99,61	2,51	84,28	99,81	74,38
Chott (El-Oued)	2,94	139,72	99,93	2,89	103,97	99,68	81,91

Tableau 4 : Paramètres relatifs aux isothermes de Langmuir et de Freundlich au cours de la coagulation-floculation

3.2 Comparaison entre la défluoruration par la chaux et par le sulfate d'aluminium

3.2.1 Pouvoir défluorant

Les rendements optima d'élimination du fluor pour chaque type d'eau par précipitation chimique à la chaux et par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium sont comparés (Tableau 5). Nous pouvons constater que, bien que les résultats soient assez voisins par les deux procédés, la précipitation chimique à la chaux

apparaît comme plus efficace que la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium pour les eaux étudiées sauf pour l'eau de Chaïba. Ceci est à rapprocher des différences de teneurs en magnésium présentes dans ces eaux (Cf. tableau 2). Les rendements défluoruration pourraient augmenter avec l'accroissement de la teneur initiale en ions Mg^{2+} . Ceci est à confirmer en étendant l'expérimentation à un plus grand nombre d'eaux naturelles chargées en fluor.

EAUX	Teneur initiale en Fluor (F ₀) (mg/l)	CHAUX	SULFATE D'ALUMINIUM
		Rendement (%)	Rendement (%)
Doucen	2,61	84,29	68,20
Chaïba	2,63	66,92	68,82
Ede-Meao	1,99	84,42	81,91
Chott	2,81	85,41	74,38

Tableau 5 : Comparaison des rendements de défluoruration par la chaux et par le sulfate d'aluminium.

3.2.2 Qualité des eaux traitées

Parallèlement aux mesures du fluor résiduel, nous avons suivi l'évolution de certains paramètres de qualité d'eau en fin de traitement (Tableau 6). Il en ressort que :

- Pour les quatre eaux traitées, la défluoruration au sulfate d'aluminium conduit à une baisse sensible du pH de l'eau après traitement contrairement à ce qui se produit lors de l'utilisation de la chaux qui est une base. Cependant, en fin de traitement, un ajustement du pH est nécessaire afin de la ramener dans la gamme de pH admissible (6,5 à 8,5), aussi bien pour la coagulation-floculation que pour la précipitation chimique à la chaux (recarbonatation).
- La dureté de l'eau brute peut être diminuée par utilisation des deux procédés mais d'une façon plus marquée lors de la précipitation chimique à la chaux. Ceci, du fait que ce dernier réactif a une action directe sur la précipitation partielle ou totale des ions Ca²⁺ et Mg²⁺ sous forme de

CaCO₃ et Mg(OH)₂. Par contre, lors de l'utilisation du sulfate d'aluminium, la diminution du TH laisse suggérer que les cations Ca²⁺ et Mg²⁺ ont pu former des ponts intraparticulaires. L'élimination partielle de la dureté totale de l'eau brute est un point favorable pour les eaux de la région d'étude.

- Le TAC est une autre paramètre chimique influencé par les deux traitements. Les deux réactifs agissent sur les bicarbonates présents dans l'eau et il se produit une diminution continue du TAC à dose croissante des deux réactifs défluorants. Toutefois, à une certaine dose de chaux il se produit (contrairement à l'utilisation du sulfate d'aluminium) une réaugmentation du TAC, due aux ions OH⁻ provenant du Ca(OH)₂.
- L'ajout de doses croissantes de sulfate d'aluminium provoque une augmentation des teneurs en sulfates en solution, après défluoruration suite à la dissolution du produit introduit à fortes doses (280 à 560 mg/l). Ce qui n'est pas favorable pour les eaux du sud algérien déjà chargées en cet élément dont les teneurs dépassent la norme de potabilité de 400 mg/l en SO₄²⁻ (O.M.S., 1972).
- Lors de l'utilisation du sulfate d'aluminium, il y'a lieu de s'assurer que la teneur résiduelle d'Al³⁺ en solution ne dépasse pas 0,2 mg/l (norme de l'O.M.S.).
- Suite aussi à une utilisation de fortes doses de chaux, on aboutit à de grands volumes de boues qui contiennent évidemment des ions fluor. Malgré leur déshydratation facile, il faut penser sérieusement à leur réutilisation dans d'autres domaines.

	Eau brute	Précipitation chimique à la chaux	Coagulation-floculation au sulfate d'aluminium	
Dose optimale du réactif défluorant (mg/l)	-	300	350	Eau de forage Chott (El-Oued)
F ⁻ (mg/l)	2,81	0,41	0,72	
pH	7,97	10,08	5,52	
TH (°F)	142	136,8	137,2	
Mg ²⁺ (mg/l)	184	152,3	-	
TAC (°F)	8,5	5,7	1,9	
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	817	-	907	
Dose optimale du réactif défluorant (mg/l)	-	300	280	Eau de forage Ede-Meao (Ourgla)
F ⁻ (mg/l)	1,99	0,31	0,36	
pH	7,66	10,49	5,81	
TH (°F)	104	89,4	94,8	
Mg ²⁺ (mg/l)	104	46	-	
TAC (°F)	7,9	4,7	2,7	
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	683	-	900	

Tableau 6 : Qualité des eaux traitées – Exemples des forages Chott et Ede-meao

4. CONCLUSION

Pour traiter des eaux fluorées du Sahara septentrional algérien, nous avons choisi de tester deux procédés physico-chimiques, en utilisant deux réactifs défluorants : le sulfate d'aluminium et la chaux.

Certaines similitudes sont apparues tant dans leur mise en œuvre (phases d'agitation, décantation,...) que dans leurs mécanismes d'action sur les ions fluorures et notamment les phénomènes d'adsorption sur les précipités formés (magnésie ou hydroxyde d'aluminium). Les résultats ont par ailleurs mis en évidence des rendements d'élimination du fluor assez voisins.

Toutefois, nous avons orienté notre choix du procédé vers la précipitation chimique à la chaux puisqu'elle a permis une réduction des teneurs en fluor bien en deçà des normes de l'O.M.S. De plus, cette méthode est particulièrement adaptée et économique pour des eaux naturellement chargées en magnésium. Par ailleurs, le sulfate d'aluminium présente l'inconvénient d'augmenter notablement la teneur finale des eaux en sulfates, voire en aluminium. Une contrainte de taille est liée également à la nécessité d'importer le sulfate d'aluminium à un coût prohibitif, comparé à la chaux largement disponible en Algérie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achour, S. (1990), La qualité des eaux du Sahara septentrional en Algérie – Etude de l'excès en fluor, Tribune de l'eau, CEBEDEAU, n°6, 42(542), 53-57.

Alexéev, V. (1970), Analyse qualitative, Edition Mir, Moscou.

Azout, B., Abraham, J. (1978), Existence et causes des fluoroses humaines dans la région d'El-Oued, Annales de l'I.N.A., Vol. VIII, n° 3, 5-12, Alger.

Brodsky, A., Zdenek, V. (1971), Possibilités de décarbonatation des eaux à la chaux, La technique de

l'eau et de l'assainissement, 3, 33-40.

Degrémont. (1978), Mémento technique de l'eau, Ed. Degrémont, Paris.

O.M.S. (1978), Normes internationales applicables à l'eau de boisson, Genève.

Rabosky, J.G. et al. (1975), Fluoride removal by lime and alum and polyelectrolyte coagulation, J.A.W.W.A., 50, 3, 669-676.

Rodier, J. (1984), L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7^{ème} édition, Ed. Dunod, Paris.

Sorg, T.J. (1978), Treatment technology to meet the interim primary drinking water regulation for inorganics, J.A.W.W.A., 40, 2, 58-64.

Tabouche, N. (1999), Etude de la répartition spatiale des teneurs en fluorures des eaux du Sahara septentrional, Thèse de Magister en Hydraulique, Biskra.

Tardat-Henry, M., Beaudry, J.P. (1984), Chimie des eaux, Edition le Griffon d'argile, I.N.C., Canada.

Travi, Y. (1993), Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal. Hydrogéologie et Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines, Sci. Geol., mémoire n°95.

Xu-Guo-Xun. (1992), Fluoride removal from drinking water by activated alumina with CO₂ gas acidizing method, J. Water SRT, AQUA, 43, 2, 58-64.

Youcef, L. (1998), Etude des possibilités d'élimination des fluorures des eaux souterraines par précipitation chimique à la chaux, Thèse de Magister en Hydraulique, Biskra.

Youcef, L., Achour, S. (1996), Etude de la précipitation chimique à la chaux du fluorure de sodium en solution synthétique, Deuxième séminaire national sur l'hydraulique, 2 – 3 Décembre, Biskra.

Youcef, L., Achour, S. (1999), Contribution à l'étude de l'excès en fluor dans quelques eaux du sud algérien, Colloque international d'hydrogéologie, 19 – 20 - 21 Octobre, Annaba.