

SOMMAIRE

DEDICACES.....	6
REMERCIEMENTS.....	7
DEFINITIONS.....	10
NOMMENCLATURE	13
UNITES.....	14
I - INTRODUCTION.....	16
II - PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DU FLUOR.....	19
II-1 - LES SOURCES NATURELLES.....	20
II-2 - LES SOURCES ANTHROPIQUES.	23
II-3 - AUTRES SOURCES.....	24
III - FLUOR ET SANTE.....	28
III-1 - NORMES ET RECOMMANDATIONS.....	28
III-2 - METABOLISME DU FLUOR : diffusion, distribution et élimination.....	28
III-3 - FLUOROSE DENTAIRE.....	30
III-4 - FLUOROSE OSSEUSE.....	34
III-5 - FLUOR ET CERVEAU.....	43
III-6 - FLUOR ET GLANDE PINEALE.....	47
III-7 - FLUOR ET GLANDE THYROIDE	47
III-8 - FLUOR ET REINS	47
III-9 - FLUOR ET ESPACE GASTRO-INTESTINAL	48
III-10 - FLUOR ET CANCER	48
III-11 - FLUOR ET REPRODUCTION	49
III-12 - FLUOR ALLERGIE ET HYPERSENSIBILITE	50
IV - PROCEDES DE TRAITEMENT DES EAUX FLUOREES.....	52
IV-1 - ETAT DE L'ART	52
IV-1-1 - LES PROCEDES CHIMIQUES CLASSIQUES.....	52
IV-1-2 - LES PROCEDES PHYSICO-CHIMIQUES.....	65
V - CHOIX DU PROCEDE	75
CONCLUSION.....	78
ANNEXE 1	80
ANNEXE 2	81

ANNEXE 3A	82
ANNEXE 3B	83
ANNEXE 3C	84
ANNEXE 3D	85
ANNEXE 4	86
ANNEXE 5	87
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.....	88
REFERENCES	90

"Au nom de Dieu, le Clément, le Très Miséricordieux"

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mon père **Amadou Samba DIOP** qui m'a toujours soutenu et n'a jamais cessé de me donner des conseils. Il s'est toujours évertué de cultiver en moi la vertu, le courage et la foi. Les prières qu'il formule à mon endroit ne sont pas restées vaines.

Merci papa et longue vie !

A ma mère **Houleye DIOP** qui ne cesse de faire des sacrifices pour la réussite de ses enfants. Elle ne s'est jamais lassée de me donner des conseils et de formuler des prières à mon endroit.

Que Dieu vous laisse en vie pendant longtemps afin que vous puissiez perpétuer vos bonnes œuvres accomplissez sur la famille.

Merci Maman !

REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus sincères vont en premier lieu au Professeur LIBASSE DIOP qui a guidé mes premiers pas dans la chimie. Son dévouement au travail, à la rigueur et à la discipline dénote de sa qualité d'un grand homme de science.

Je remercie Monsieur Courfia DIAWARA qui, après avoir participé à ma formation, a bien accepté de guider mes premiers pas dans la recherche avec rigueur et méthode. Je lui remercie très sincèrement pour sa disponibilité, ses conseils, son sens d'écoute et de dialogue.

Je remercie très particulièrement Madame Aminata DIASSE-SARR pour avoir participé à ma formation et pour l'honneur qu'elle nous a fait de présider ce Jury. Ses conseils et remarques pertinentes m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens également à remercier Monsieur Serigne FAYE, Maître de conférences, chef de département de Géologie à la Faculté des Sciences et Techniques, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être le rapporteur.

Je remercie Monsieur Malick FAYE, maître-Assistant en Odontologie Pédiatrique à la Faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odontologie, de ses conseils et remarques pertinentes, mais aussi de l'honneur qu'il nous a fait de juger ce travail.

J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Monsieur Cheikh Abdoul Khadir DIOP pour sa participation à ma formation, et surtout pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie l'ensemble des membres du département de chimie qui ont participé de près ou de loin à ma formation.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les membres du Laboratoire pour leur soutien sans faille et l'ambiance de fraternité qu'ils ont su créer au sein dudit lieu dans le seul souci du progrès.

A mes frères et sœurs de m'avoir soutenu moralement et financièrement, mais aussi pour leurs encouragements.

A mon grand frère et complice El hadji Omar DIOP pour sa collaboration et sa compréhension dans les moments difficiles.

Je remercie mes amis de la promotion 2001 de l'école militaire de santé (EMS) qui m'ont aidé sur la définition de certains termes médicaux.

A mon oncle, mes tantes, mes cousins et cousines qui m'ont accueilli et accordé toute leur affection depuis que j'ai entamé les études universitaires, je dis merci.

Je remercie enfin toute ma famille, mes amis et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.



GLOSSAIRE

DEFINITIONS

Acétylcholine : médiateur chimique libéré par le nerf sympathique.

Acroparesthésie : ensemble de sensations pénibles (engourdissements, fourmillements, picotements) au niveau des mains et des doigts, survenant la nuit et souvent accompagnées de douleurs intenses du bras.

Améloblastes : cellules sécrétrices de l'émail.

Amélogénèse : c'est la formation de l'émail.

Ankylose : c'est une fixation et une immobilité d'une articulation, ayant pour origine une blessure ou une maladie.

Arthrite : inflammation aigue ou chronique des articulations, d'origine bactérienne ou rhumatismale.

Athralgie : douleur articulaire.

Atrophie : diminution du volume ou du poids d'un tissu, d'un organe.

Asthénie : fatigue générale.

Cachexie : altération profonde de toutes les fonctions de l'organisme à la suite d'une maladie chronique grave.

Calcifications insertionnelles capsulaires : dépôt de calcium sur les tissus capsulaires.

Carie dentaire : altération de l'émail et de l'ivoire de la dent, évoluant vers l'intérieur par formation de cavités qui aboutissent à la destruction de celle-ci.

Cholinestérase : ferment hydrolysant l'acétylcholine dans le sang.

Cyphose : déviation de la colonne vertébrale à convexité postérieure.

Cytotoxique : toxique aux cellules.

Dentine : élément constitutif de l'ivoire de la dent, d'une consistance proche de celle de l'os.

Dyspnée : trouble de la respiration accompagnant les affections respiratoires et cardiaques, et certains accidents neurologiques.

Epididyme : organe cylindrique s'étendant sur le testicule.

Epinard : c'est une plante potagère, annuelle ou bisannuelle, de la famille des Chénopodiacées. Originaire de l'Iran, il est aujourd'hui cultivé dans toutes les régions tempérées pour ses qualités nutritionnelles.

Evaporites : ce sont des roches sédimentaires constituées de minéraux ayant précipité à la suite d'une augmentation de leurs concentrations dans une saumure.

Gastrite : inflammation aigue ou chronique de la muqueuse de l'estomac, aux causes variées (ulcères, alcoolisme, carences alimentaires...).

Gentiane : plante de montagne recherchée pour ses racines, qui servent à préparer des liqueurs et des remèdes.

Gibbsite : c'est un important minéral d'aluminium et l'un des trois composés minéraux qui constituent la bauxite et dont la formule chimique est $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Glycolyse : destruction métabolique du glucose.

Goethite : c'est un minéral d'hydroxyde de fer polymorphe du composé $\text{FeO}(\text{OH})$.

Gravide : se dit d'une femelle prête à pondre (insectes, oiseaux...) ; chez les mammifères, ce terme désigne les femelles en cours de gestation.

Karst : c'est un paysage façonné dans des roches solubles carbonatées. Ce n'est pas une roche mais bien un paysage qui peut se développer dans le calcaire (principalement), le marbre, la dolomie ou encore la craie.

Liliacées : famille de plantes monocotylédones à bulbes ou à rhizome, pour la plupart des herbacées et vivaces. Le lis, la tulipe, le colchique, le muguet sont des liliacées.

Liquide amniotique : liquide dans lequel baigne le fœtus.

Maquereau : c'est un poisson téléostéen de haute mer, apprécié pour sa chair et faisant l'objet d'une pêche industrielle.

Marmoréen : de la nature du marbre ou qui en a l'apparence.

Métacarpo-phalangienne : zone de transition entre métacarpes et phalanges.

Mica : c'est un minéral formé principalement de silicate d'aluminium et de potassium ; il est l'un des constituants du granite.

Nécrose : c'est la forme principale de mort cellulaire lors d'accidents traumatiques, suite à certaines pathologies ou lors de déficits métaboliques.

Ostéodystrophie rénale : ensemble de manifestations osseuses dues à une insuffisance rénale chronique.

Ostéocondensation : excès de tissu osseux ou augmentation de la densité osseuse.

Ostéoporose : diminution progressive de la trame protéique de l'os. Elle est très fréquente chez les femmes après la ménopause, elle expose à des fractures des vertèbres et du col du fémur.

Ostéosclérose : accroissement de la densité osseuse en rapport avec une lésion.

Ostéotrope : elle se dit d'une substance qui se fixe sélectivement sur les os.

Paléokarst : karst fossile formé par les galeries des étages supérieurs ; ne servant plus à la circulation de l'eau.

Parenchyme : tissu formé de cellules vivantes peu différenciées, à parois minces, qui remplit diverses fonctions.

Périostée : membrane fibreuse blanchâtre gainant l'os à l'exception des surfaces articulaires.

Prophylactique : partie de la médecine qui pour objet de prévenir l'apparition et le développement des maladies ; ensemble des mesures prises en cette fin.

Protoplasmique : relatif au cytoplasme.

Rachis : colonne vertébrale, épine dorsale.

Radis : plante potagère cultivée pour sa racine comestible. Cette racine de couleur rose ou noire et de saveur piquante est consommée.

Réabsorption tubulaire : la réabsorption tubulaire consiste dans le passage d'une molécule de la lumière du néphron vers le sang.

Roches sédimentaires : elles résultent de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique (restes de végétaux ou d'animaux), ou de précipitation chimique; ce sont des roches exogènes, qui se forment donc à la surface de la Terre.

Rosacées : famille de plantes dicotylédones, dialypétales, comprenant de très nombreuses espèces.

Superphosphate : c' est un engrais minéral phosphaté obtenu par attaque chimique d'un phosphate naturel par un acide (acide sulfurique ou acide phosphorique).

Topaze : est un cristal de fluorosilicate d'aluminium (minéral) dont la formule chimique est : $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$.

Translocation foliaire : déplacement d'un segment de chromosome sur un chromosome non analogue d'une feuille à une autre.

Truites : poisson salmonidé comestible, plus petit que le saumon, tacheté de couleurs variées.

Voie stomatique : organe épidermique des parties aériennes des végétaux, constitué de deux cellules se touchant par leurs extrémités et ménageant entre elles une ouverture appelée ostiole.

NOMMENCLATURE

AA: alumine activée.
ANDDH : Association Nigérienne pour la Défense des Droits de l'Homme.
CFA : Communauté Financière Africaine.
ChE : cholinestérase.
 C_0 : concentration initiale de fluor.
 C_p : concentration de fluor dans le perméat.
Da : dalton.
DDW : “deionized distilled water ”, (eau distillée deionisée).
ED : électrodialyse.
EWG: environmental working group.
FCV: facteur de concentration volumique.
HOGGY: hospital général de grand yoff.
ICM : incisives centrales maxillaires.
IRD : institut de recherche pour le développement.
ISF : indice synthétique de fécondité.
 K_s : constante de solubilité.
KRASS : Krishna Ram Ayurvigyan Shodh Sansthan
MFP : monofluorophosphate disodique.
NA: nalgonda.
NF : nanofiltration.
OI : osmose inverse.
OMS : organisation mondiale pour la santé.
ONEP : office national de l'eau potable du Maroc.
Païsa : unité monétaire de certains pays d'Asie.
pH : potentiel hydrogène.
ppb : partie par billion.
ppm : partie par million.
PVC: polychlorure de vinyle.
Q.I : quotient intellectuel.
 Q_0 : débit d'eau initial.
 Q_p : débit d'eau dans le perméat.
SDE : société des eaux du Sénégal.
SNE : société nationale des eaux du Niger.
SGW: simulated geothermal water ; (eau reconstituée).
SW : sea water ; (eau de mer).
TAC : titre alcalimétrique complet.
TDS : total dissolved solids ; (substances totales dissoutes).
TR: taux de rétention.
TRG: taux de rétention global.
TRS: taux de rétention spécifique.
UF : ultrafiltration.
UNICEF : united nations children's fund ; (fond des nations unies pour l'enfance).
 V_0 : volume initial de l'eau brute.
 V_p : volume d'eau dans le perméat.
 V_R : volume d'eau dans le rétentât.
Y : taux de conversion.

UNITES

°C : degré Celsius.
cm : centimètre.
 g.Kg^{-1} : gramme par kilogramme.
 g.L^{-1} : gramme par litre.
 g.m^{-3} : gramme par mètre cube.
g/mol : gramme par mole.
h : heure
 $\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$: joule par kilogramme par Kelvin.
K : degré Kelvin.
 KJ.mol^{-1} : kilojoule par mole.
 KW/m^3 : kilo watt par mètre cube.
 KWh/m^3 : kilo watt heure par mètre cube.
L : litre.
 l/h/m^2 : litre par heure par mètre carré.
 m^3 : mètre cube.
mg : milligramme.
 mg/cm^3 : milligramme par centimètre cube.
 mg/m^3 : milligramme par mètre cube.
 mg.j^{-1} : milligramme par jour.
 mg.Kg^{-1} : milligramme par kilogramme.
 mg.L^{-1} : milligramme par litre.
min : minute.
ml : millilitre.
 ml.min^{-1} : millilitre par minute.
 $\text{m}^3.\text{mol}^{-1}$: mètre cube par mole.
mole/L : mole par litre.
pm : pico mètre (10^{-12} m).
ppb : partie par billion (10^{-3} ppm).
ppm : partie par million.
uma : unité de masse atomique.
 μm : micro mètre
 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$: watt par mètre par Kelvin.



INTRODUCTION

I - INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, le monde est marqué par des bouleversements notamment dans les domaines technologiques. Au cœur de ces mutations, l'eau, essentielle et indispensable occupe une place fondamentale. L'eau est présente à la surface du globe terrestre à hauteur de 70 % [1]. Cependant, elle est inégalement répartie et reste très peu exploitée. La demande d'eau en qualité et quantité suffisante se fait, en effet, de plus en plus pressante, surtout dans les pays en développement à cause du phénomène d'urbanisation massive. Cette ressource est utilisée aussi bien pour les besoins de l'agriculture (irrigation), de l'industrie (eau de brasseries et boissons gazeuses, sucreries et raffineries de sucres, hydrométallurgie...) que pour la consommation humaine. Dans cette dernière utilisation, il est évident qu'on doit s'assurer que l'eau est exempte de toutes substances nuisibles à la santé. En effet, une eau potable est indispensable à une bonne santé des populations qui la consomment car prévenant des maladies telles que la diarrhée, le choléra...etc. [2]. Une eau de qualité destinée à la boisson a des conséquences sur la santé publique, un impact sur le développement économique et social, car une personne malade est incapable de développer des activités productrices : d'où l'importance de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. Il faut noter que beaucoup de pays du monde présentent des eaux très riches en fluor (ANNEXE 1) [3]. La consommation de telles eaux engendre des problèmes graves de santé publique dans plusieurs pays du monde. Dans les années 1980, une estimation montrait que près de 260 millions de personnes dans le monde consommaient une eau contenant plus de 1 mg/L de fluor. En effet, le problème de l'excès de fluor dans l'eau est grave dans des pays comme l'Inde, la Chine et le Mexique où les populations sont exposées à une fluorose endémique [3]. En englobant ainsi d'autres populations comme celles de l'Afrique, à travers des pays tels que le Sénégal (Diourbel, Fatick, Kaolack...), le Niger, l'Ethiopie, le Kenya, la Tanzanie (Arusha, Kilimanjaro, Mwanza, Mara...) [3, 4] et l'Afrique du Sud (Karoo, Northern Cape, Limpopo, North-west Provinces...) [3, 5] ; mais aussi celles du bassin méditerranéen, avec le Maroc, l'Algérie, la Turquie et l'Israël, ou encore d'Amérique du Sud avec l'Argentine, le total de la population mondiale atteinte de fluorose excède très vraisemblablement les 70 millions [3]. Au Sénégal, la majeure partie des populations situées dans la zone du bassin arachidier consomment une eau fortement fluorée et sont exposées à des fluoroses dentaire et osseuse, et même à des troubles neurologiques [6]. On peut aussi citer le cas de certaines zones aux États-Unis où l'augmentation de la teneur de l'eau potable en fluor a provoqué un accroissement de la mortalité par cancer du foie, cancer des os, tumeurs des cellules squameuses de la bouche, et autres méfaits [7]. Par conséquent, les effets sur la santé de la consommation régulière et continue

d'une eau très riche en fluor sont aussi graves que variés. Nous pouvons noter en plus des maladies sus citées, l'effet sur le développement de l'intelligence des enfants tel que décrit par Yan LU et coll. [8]. Dès lors, la défluoruration des eaux destinées à la consommation humaine s'avère pertinente et devient une nécessité partout où elles présentent une concentration en fluor au dessus des recommandations de l'O.M.S (0,7-1,5mg/L).

Dans ce travail, nous nous proposons de faire le tour de la question sur les principales techniques existantes et qui présentent des possibilités de défluoruration partielle des eaux destinées à la consommation de certaines régions du Sénégal. Nous aborderons en premier lieu les méthodes classiques de défluoruration (précipitation, adsorption) nécessitant l'ajout d'une certaine quantité de réactifs chimiques; et ensuite nous verrons celles plus récentes de séparation à membranes (résines échangeuses d'ions, électrodialyse, nanofiltration, osmose inverse...) ne nécessitant pas l'ajout de réactifs chimiques. L'objectif de cette étude est de pouvoir choisir la technique la plus appropriée, du point de vue investissement, exploitation, amortissement et impact sur l'environnement en vue d'une élimination partielle du fluor pour le cas spécifique du Sénégal où l'effet de la salinité joue, en plus du fluor, un rôle considérable. Nous tenterons d'évaluer les différentes méthodes aussi bien du point de vue du rendement technique du procédé que du coût de l'opération pour mettre en exergue celle qui semble la mieux adaptée pour le Sénégal, puis nous dégagerons les perspectives.

A decorative horizontal border with a scroll-like appearance on the left and right sides, containing the title text.

PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DU FLUOR

II - PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DU FLUOR

Le fluor qui appartient à la famille des halogènes, est l'élément le plus électronégatif et par suite l'oxydant le plus puissant de la chimie. Du fait de sa grande réactivité, il ne se rencontre pas à l'état libre dans la nature [9]. Le fluor, communément présent dans la fluorine (ou spath-fluor) CaF_2 , la cryolithe (ou aluminofluorure de sodium) Na_3AlF_6 et la fluoro-apatite $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$, vient au 13^{ème} rang des éléments les plus abondants dans la nature [10,11]. Les propriétés physico-chimiques du fluor sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1: propriétés physico-chimiques du fluor [12].

Propriétés atomiques		Propriétés physiques		Autres propriétés	
Masse atomique (u.m.a.)	18,9984	Etat de la matière	Gaz diatomique de couleur jaune-pâle	Electronégativité (Pauling)	4
Rayon atomique [calc] (pm)	50 [42]	Température de fusion (K)	53,53	Chaleur massique (J/Kg.K)	824
Rayon de covalence (pm)	71	Température de vaporisation (K)	85,03	Conductivité thermique (W/m.K)	0,0279
Rayon de Van Der Waals (pm)	147	Volume molaire (m^3/mol)	$11,20 \cdot 10^{-3}$	1 ^{er} potentiel d'ionisation (KJ/mol)	1681,0
Configuration électronique	[He] $2s^2 2p^5$	Energie de vaporisation (KJ/mol)	3,2698	2 ^e potentiel d'ionisation (KJ/mol)	3374,2
Nombre d'électrons/niveau d'énergie	2 ; 7	Energie de fusion (KJ/mol)	0,2552	3 ^e potentiel d'ionisation (KJ/mol)	6050,4
Etat d'oxydation	-1 (acide fort)			4 ^e potentiel d'ionisation (KJ/mol)	8407,7
Structure cristalline	Cubique				

Le fluor (du latin fluere signifiant flux ou fondant) est décrit par Georigius AGRICOLA en 1529 sous sa forme de fluorite comme une substance utilisée pour promouvoir la fusion des métaux ou des minéraux.

En 1670 SCHWANDHARD remarqua que le verre était attaqué lorsqu'il était exposé à de la fluorite traitée à l'acide. Karl SCHEELE ainsi que d'autres chercheurs tels que Humphry DAVY, Gay-Lussac, Antoine LAVOISIER et Louis THENARD firent des expériences avec de l'acide fluorhydrique (HF) dont certaines se terminèrent en tragédie en raison du danger de ce produit.

En 1771, C. W. SCHEELE a préparé pour la première fois du fluorure d'hydrogène (ou acide fluorhydrique) en faisant réagir des fluorures avec de l'acide sulfurique concentré.

C'est effectivement en 1824 que le chimiste BERZELIUS prouva l'existence d'un nouvel élément. Mais son isolation causa un problème pendant plus de 50 ans. On proposa le nom de «fluor» pour ce nouvel élément, qui signifie en grec, destructif, car cela semblait être un nom approprié pour décrire les propriétés destructrices de cet élément chimique [13].

Le chimiste français Henri MOISSAN fut le premier à isoler le fluor, le 26 juin 1886, grâce à sa propre invention, le four à arc électrique. Il reçut le prix Nobel en 1906, une année avant sa mort, pour avoir isolé le fluor [13].

Le fluor ne date pas du XIX^e siècle; certains archéologues soutiennent qu'il était présent à l'origine des plantes et des hommes. Sa présence est surtout associée aux volcans et eaux naturellement fluorées. L'être humain est le seul «animal» qui creuse des puits pour trouver son eau de consommation, et les nappes d'eau découvertes possèdent souvent une forte concentration en ion fluoré surtout dans les régions recevant peu de pluie et les régions volcaniques. Dans son livre «Fluoride and the Aging Factor» [14], J. YIAMOUYIANNIS cite plusieurs endroits sur la planète où des gens meurent jeunes suite à l'empoisonnement au fluor présent naturellement dans leur eau de consommation [13].

Le fluorure peut arriver dans le sol, dans l'air et dans l'eau par l'intermédiaire de sources naturelles ainsi que de sources anthropiques [15].

II-1 LES SOURCES NATURELLES

Le fluor d'origine naturelle provient de la dissolution de certaines roches dans l'eau [16]. Les sources naturelles à l'origine de la présence du fluor dans les eaux souterraines les plus couramment constatées sont :

- La nature des roches de l'aquifère ;
- Le temps de contact entre l'eau et les minéraux fluorés ;
- Le contrôle chimique des eaux.

➤ La nature des roches de l'aquifère

D'un point de vue géologique, les eaux riches en fluor peuvent se rencontrer dans les trois grands types de terrain que sont les bassins sédimentaires, les zones de socle cristallins et les régions volcaniques. Dans le premier cas, l'origine du fluor provient du fait que, excepté pour les évaporites, le fluor est l'halogène le plus abondant des roches sédimentaires [17]. La fluorite, l'apatite ou fluoro-apatite des bassins phosphatés et les micas sont les principaux minéraux

fluorés de ces roches [18]. Dans le second cas, la région la plus connue et la mieux documentée est le Rift Est-Africain, où des teneurs allant jusqu'à 180 mg/L ont pu être observées dans des lacs au Kenya [19]. Le fluor vient alors soit du lessivage des roches magmatiques alcalines possédant des minéraux tels que l'apatite, la topaze ou la fluorine soit de l'activité volcanique elle-même qui engendre des apports gazeux fluorés tel que HF [20]. Enfin, des exemples d'eaux souterraines dépassant largement la teneur en fluor recommandée par l'OMS (<1,5 mg/L) et provenant d'aquifères granitiques ont été localisés en Inde, en Thaïlande, en Chine, en Afrique du sud et dans la partie Est du Sénégal [3].

Le fluor peut être naturellement présent dans les eaux de surface à la suite d'un dépôt de particules provenant de l'atmosphère ou d'une altération atmosphérique des roches et des sols contenant du fluorure [15].

➤ Le temps de contact entre l'eau et les minéraux fluorés

L'hydrodynamique du système aquifère joue un rôle important dans le temps de contact entre l'eau et les roches. Ainsi, lorsque le flux des eaux souterraines est relativement lent, une nette augmentation des teneurs en substance totale dissoute (TDS) et en fluor est observée. Le rôle du climat est donc ici très important. En effet, les faibles précipitations des régions arides entraînent généralement des temps de transfert de l'eau souterraine plus longs que dans les zones humides. Les temps de contact eau/roche plus longs provoquent alors un enrichissement de l'eau en substances minérales. L'importance de l'hydrodynamique du système est également notable par la présence de quantité de fluor, souvent plus forte en aquifère captif que dans les aquifères superficiels. En région aride l'évaporation qui affecte les eaux superficielles et les sols, susceptibles de s'infiltrer, est aussi un facteur important de l'augmentation des concentrations des eaux souterraines en fluor [3].

➤ Le contrôle chimique des eaux

Les eaux souterraines se chargent en fluor après lessivage de roches phosphatées probablement par dissolution des apatites fluorées dont la solubilité augmente avec la température des nappes considérées. Le niveau de saturation des eaux dépend principalement du déplacement de l'équilibre (1) de formation de la fluorine (CaF₂) :



La teneur en calcium (Ca^{2+}), l'équilibre des eaux en calcite (CaCO_3), gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la formation de complexes calciques (CaSO_4 , CaHCO_3^+ , CaCO_3) sont des facteurs importants pour le déplacement de cet équilibre [21]. Par rapport au contrôle chimique, la concentration en fluor dans les eaux dépend essentiellement de l'état de saturation vis-à-vis de la fluorine; si l'eau est sous-saturée, la teneur en fluor est généralement le reflet de la quantité disponible au sein de la roche lessivée. Par contre, dans le cas d'une eau saturée, la concentration en fluor est alors limitée par la valeur de la constante de solubilité K_s de la réaction (1) ci-dessus :

$$K_s = [\text{Ca}^{2+}] [\text{F}^-]^2$$

$$K_s = 10^{-10,57} \text{ à } 25^\circ \text{ C [22].}$$

La comparaison des teneurs en fluor obtenues par Travi [23] dans les aquifères Sénégalais et Tunisiens illustre clairement ce rôle joué par la constante de solubilité de la réaction (1). En effet, bien que situés tous les deux dans des formations sédimentaires phosphatées et présentant tous les deux des eaux saturées vis-à-vis de la fluorine, les concentrations mesurées au Sénégal peuvent s'élever jusqu'à 13 mg/L tandis que celles obtenues en Tunisie ne dépassent que très rarement les 2 mg/L. La cause d'une telle différence vient de la présence, dans le cas de la Tunisie, de roches tel que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) engendrant un apport et une concentration non négligeable de calcium dans les eaux souterraines limitant ainsi les teneurs en fluor beaucoup plutôt qu'au Sénégal [3].

Par conséquent, les fortes teneurs de fluor semblent donc associées le plus souvent à des eaux souterraines possédant des valeurs élevées de pH (>7) facilitant ainsi les échanges ioniques entre fluorures F^- et groupements hydroxyles OH^- , et de type bicarbonaté-sodique (Na^+ , HCO_3^-) caractérisées par des faibles concentrations en magnésium et en calcium en raison de la faible solubilité de la fluorine [3].

Dans le cas des eaux du littoral, les rejets d'acides fluorhydriques sont rapidement nocifs pour le milieu marin environnant, le pouvoir tampon de l'eau de mer n'étant pas illimité. Dans l'eau de mer, la solubilité totale en fluorine est essentiellement due au complexe formé avec les ions magnésium MgF^+ . Si l'on rejette du fluorure de calcium, il se dissout partiellement selon l'équilibre (2) suivant :



La solubilité totale du fluor (MgF^+ , CaF^+ , F^-) dans l'eau de mer est de l'ordre de $3,8 \cdot 10^{-3}$ mole/L, soit 70 mg/L. On y rencontre habituellement une concentration qui varie de 0,8 à 1,4 mg/L. Cette concentration en fluorure soluble peut rester constante dans un large domaine de pH. Le risque de contamination par la chaîne trophique est alors plus important que par voie aqueuse directe (absorption cumulative par les animaux marins) [21].

II-2 LES SOURCES ANTHROPIQUES

L'apport en fluor dans les eaux souterraines peut également provenir d'activités anthropiques. L'utilisation agricole intensive d'engrais phosphatés, d'insecticides ou d'herbicides contenant des fluorures en tant que constituant essentiel ou sous forme d'impuretés tels que la cryolithe (Na_3AlF_6) et le fluorosilicate de baryum (BaSiF_6) induit généralement une pollution des nappes phréatiques aux alentours des sols ayant subi un tel traitement [3]. On trouve généralement associés dans la nature du fluorure de calcium et du phosphate de calcium sous forme de fluoro-apatite [21]. Dans les pays producteurs de phosphates (Etats-Unis, Afrique du Nord et Afrique de l'Ouest), la présence du minerai de phosphate (hydroxy-apatite) est souvent associée à celle du minerai de fluor (fluoro-apatite). Cette corrélation entre indices phosphatés des sols et présence d'eaux hyperfluorurées a été décrite par PONTIE et coll. [6] sur la zone Mbour-Thiès-Diourbel-Fatick au Sénégal. Des eaux très chargées en ions fluorures circulent dans un paléokarst situé sous une couche quasi continue de sédiments phosphatés; la concentration en ions fluorures chute dès l'interruption de cette couverture pour se trouver en dessous de 0,1 mg/L au-delà [21]. Dans ces régions, les eaux en provenance des nappes captives peuvent avoir des teneurs en fluor excessives. Les concentrations en fluorure couramment rencontrées varient de 5 à 15 mg/L selon la saison; exceptionnellement des pointes maximales atteignant 20 mg/L peuvent être enregistrées [6].

En France aussi, l'inventaire cartographique réalisée par le ministère des affaires sociales et de la solidarité nationale (1985) montre que les eaux de consommation les plus chargées en ions fluorure se regroupent dans le bassin parisien et aquitain, où là aussi les indices phosphatés des sols jouent un rôle majeur. Dans le bassin parisien, les concentrations en fluorure dans les différentes nappes peuvent varier entre 0,3 et 12 mg/L; tandis que dans le bassin aquitain, la présence d'eaux assez fortement fluorurées a été mise en évidence avec des teneurs variant entre 0,6 et 4,2 mg/L [21]. Dans certaines eaux de surface, la présence de fluor est surtout liée aux rejets des unités de production d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés, ainsi qu'à ceux des usines d'aluminium dont le principe de production est l'électrolyse d'une solution d'alumine dans

la cryolithe fondue (Na_3AlF_6) [9]. Le cas des eaux de l'aquifère «Spokane» dans l'Etat de Washington aux USA où des teneurs élevées de fluor ont pu être constatées, notamment dans les puits situés aux alentours du site industriel, illustre parfaitement le cas d'une contamination en fluor provenant de la présence d'usine de traitement d'aluminium [24].

II-3 AUTRES SOURCES

➤ Production

L'électrolyse de l'acide fluorhydrique (HF) ou de l'acide potassium fluor (KHF_2) est pratiquement la seule méthode de production industrielle du fluor. En effet, la première production commerciale de fluor eut lieu lors de la fabrication de la bombe atomique dans le cadre du projet Manhattan lors de la Seconde Guerre mondiale [13].

➤ Utilisation

Le fluor et ses dérivés sont assez largement utilisés industriellement : fabrication de l'aluminium, de l'hexafluorure d'uranium (enrichissement de l'uranium 235), industries du verre et de la céramique, insecticides, dérivés organiques et minéraux...etc. [9]. Les produits dentaires qui contiennent du fluor sont maintenant très répandus; ils comprennent les pâtes dentifrices, les suppléments, les bains de bouche et les gels et vernis appliqués par les spécialistes [25].

Le fluor est un excellent raticide car il est un poison protoplasmique. Il produit la mort par une inhibition d'enzymes, par hypocalcémie, déchirements cardiovasculaires et divers dommages d'organes [13].

➤ Le fluor dans l'alimentation

Les poissons de mer (maquereaux, sardines) sont riches en fluor mais cet élément est essentiellement concentré dans les écailles et les arêtes... etc. Les fruits et légumes consommés par l'homme ont une teneur de l'ordre de 0,1 à 0,4 mg/kg. Certains (radis, épinards) en contiennent davantage (0,4 à 8,0 mg/kg). Le thé est particulièrement riche en fluor (environ 0,5 - 1,5 mg/L). La teneur en fluor des aliments peut être modifiée compte tenu des procédés industriels ou domestiques mis en oeuvre pour leur traitement, leur préparation ou leur cuisson.

Comparativement au fluor contenu dans l'eau, qui est rapidement et presque totalement absorbé, le fluor présent dans les aliments passe très lentement, et dans de faibles proportions, la barrière gastro-intestinale [13].

➤ Le fluor dans l'air

Quand le fluor est lié à de très petites particules il peut rester dans l'air pendant une longue période. Des gaz fluorés sont rejetés par les industries ; ceux-ci sont dangereux et à des concentrations très élevées, ils peuvent entraîner la mort. A faibles concentrations, ils provoquent des irritations aux yeux et au nez. La concentration de l'air en ion fluorure dans une région rurale ou urbaine résidentielle est généralement très basse, soit de l'ordre de 0,04 à 1,20 ppb (0,03 à 0,9 mg F/m³). Cette concentration peut être augmentée très appréciablement par l'activité industrielle. À proximité d'usines d'aluminium, on a observé des concentrations de fluorure dans l'air de 3 à 18 ppb et atteignant quelquefois même 89 ppb (70 mg F/m³) [13].

Depuis le début de la fluoration, on cherche à minimiser l'importance des fluorures dans l'atmosphère, pourtant certains composants fluorés, notamment l'acide fluorhydrique, sont toxiques à des concentrations d'une partie par milliard (10⁻³ ppm) [13].

➤ Le fluor dans le sol

Quand il se dépose sur le sol, le fluor se lie fortement aux particules du sol. Le fluor est présent naturellement dans la croûte terrestre où on peut le trouver dans les roches, le charbon et l'argile. Le charbon peut contenir jusqu'à 500 ppm de fluorures, dont une partie se volatilise avec les cendres [13].

➤ Le fluor dans les plantes

Le fluor que l'on trouve dans le sol peut s'accumuler dans les plantes. La quantité absorbée par les plantes dépend du type de plante, du type de sol, de la quantité et de la forme de fluor présent dans le sol. Pour les plantes qui sont sensibles aux expositions de fluorure, même des concentrations faibles peuvent entraîner des dommages et gêner leur croissance. Les fluorures gazeux ou solides pénètrent dans les plantes par voie stomatique ou par translocation foliaire directe. L'absorption racinaire intervient aussi, en particulier dans les sols fortement pollués par ces substances [13].

Etant donné que le fluor joue un rôle physiologique marginal chez les plantes et qu'il ne peut être métabolisé, il s'accumule à des taux considérables, en particulier dans le système foliaire. Quand la concentration en fluorure atteint un certain seuil, variable avec l'espèce végétale considérée, des lésions foliaires apparaissent: il se produit une coloration gris verdâtre du parenchyme avant qu'une nécrose ne se développe [13].

Les plantes les plus sensibles (liliacées, gentianes, rosacées arborescentes, conifères, vignes) peuvent être affectées par une semaine d'exposition à une concentration faible de 1 ppb de

fluorure. En plus, les fluorures inhibent de façon très importante l'activité photosynthétique des végétaux à des concentrations nettement moindres que celles nécessaires pour induire des lésions foliaires. Ils inhibent aussi l'énolase, un enzyme essentiel à la glycolyse chez les végétaux [13].

➤ Le fluor chez les animaux

Les animaux qui consomment des plantes contenant du fluor peuvent accumuler des quantités importantes de fluor dans leur organisme. Le fluor s'accumule d'abord dans les os, donc un animal exposé à des concentrations importantes de fluor souffre de dégradation des os. Une surdose en fluor peut aussi engendrer une perturbation du développement des griffes [13].

Les animaux qui s'alimentent avec des fourrages contenant des fluorures présentent à long terme des signes d'intoxication de fluorose. En effet, en sus de ses propriétés cytotoxiques intrinsèques, le fluor, par suite de ses affinités pour le calcium, perturbe les processus d'ossification; ce qui mène au bout d'un temps variable suivant l'intensité de l'intoxication, des troubles locomoteurs se manifestant chez les bovins et amenant peu à peu l'animal dans l'impossibilité de se mouvoir. Il n'est pas rare de constater, dans les cas de femelles gravides, des avortements ; enfin s'installe une cachexie progressive fatale aux animaux intoxiqués [13].

Les oeufs des grenouilles subissent un retard dans leur développement embryonnaire lorsqu'ils sont soumis à une concentration de 1 ppm de fluorure. Il en est de même pour la métamorphose des têtards. Des effets défavorables sur l'embryogenèse des oeufs de poissons dans une eau ayant une concentration de fluorure de 1,5 ppm sont également rapportés. D'autres études sur la toxicité des fluorures vis-à-vis des poissons ont montré que les oeufs de truites n'éclosent pas normalement en présence de 1,5 ppm de fluorure. Quant aux truites adultes, elles sont tuées par des concentrations de 2,7 à 4,7 ppm si elles y sont exposées pendant plusieurs jours [13].

A decorative horizontal scroll frame with a black outline. The left end features a vertical scroll bar with a circular end. The right end has a small circular scroll detail. The text "FLUOR ET SANTE" is centered within the frame.

FLUOR ET SANTE

III - FLUOR ET SANTE

III-1 NORMES ET RECOMMANDATIONS

Comme tout oligo-élément, le fluor est nécessaire et bénéfique pour l'organisme humain à de faibles concentrations, mais toxique à plus fortes doses. En effet, à partir de 0,5 mg/L en ions fluorure, une eau joue un rôle prophylactique, mais le risque de fluorose débute et devient fort au dessus de 1,5 mg/L [21].

Une relation entre la concentration de fluor dans l'eau et le risque de fluorose a été faite, ainsi entre 0,5 et 1,5 mg/L, la bonne santé dentaire est favorisée; entre 1,5 et 4 mg/L, il y a un risque de fluorose dentaire; entre 4 et 10 mg/L, la fluorose concerne les dents et les os; et au-delà de 10 mg/L un stade avancé de fluorose (crippling fluorosis) est atteint [16].

Au-delà de 1,5 mg/L, la consommation trop élevée en fluor est telle que son effet protecteur anticarie est dominé par des effets toxiques, non négligeables, de fluoroses dentaire ou osseuse [16].

Au Sénégal, comme dans de nombreux autres pays du monde, les études montrent qu'à partir de 2 mg/L, tous les enfants sont atteints et que 60 % d'entre eux ont des fluoroses graves pour des teneurs voisines de 4 mg/L [21].

En raison des conséquences néfastes que l'excès de fluor dans l'eau de boisson peut causer aux populations exposées, l'OMS fixe une valeur guide de 1,5 mg/L et précise que les normes spécifiques à chaque pays devraient tenir compte des conditions climatiques, de la quantité d'eau consommée ainsi que des autres apports éventuels. Les directives du conseil des communautés Européennes (actuel Union Européenne) et la réglementation Française indiquent que la teneur en fluor doit être inférieure à 1,5 mg/L pour une température moyenne de l'aire géographique considérée comprise entre 8°C et 12°C et à 0,7 mg/L pour une température moyenne de l'aire géographique considérée comprise entre 25°C et 30°C [9]. Cette différence correspond au fait que de façon générale la consommation d'eau pour un individu donné augmente avec la température [3]. Au Sénégal, la SDE qui est la principale société de distribution d'eau, fixe la valeur guide de 1,5 mg/L pour le fluor comme préconisée par l'OMS [26].

III-2 METABOLISME DU FLUOR : diffusion, distribution et élimination

➤ Absorption et diffusion

Le fluor et ses dérivés font partie de l'environnement humain normal car ils sont largement répartis dans la nature et de ce fait présents, à des concentrations variables, dans presque tous les aliments. Selon certains auteurs, l'apport alimentaire varie de 0,5 à 2 mg/j [9]. L'absorption de

fluorure d'origine alimentaire a été supérieure à 90 % lors d'études d'équilibres menées sur des volontaires humains [27,28]. Le fluorure de sodium (NaF) ingéré est rapidement absorbé dans la voie gastro-intestinale [15]. L'absorption du fluor se fait par diffusion tout au long du tube digestif, la rapidité étant fonction de la solubilité des fluorures et de l'acidité gastrique [9]. En effet, le fluorure de sodium (NaF) est plus rapidement absorbé que la fluorine CaF_2 et le mono fluoro phosphate disodique (MFP ou $\text{Na}_2\text{PO}_4\text{F}$) qui sont moins solubles dans l'eau [29,30]. Dans le plasma, la forme active très largement majoritaire est la forme ionique libre. La concentration plasmatique maximale est atteinte 30 à 60 minutes après l'ingestion [31].

➤ Distribution dans l'organisme

Environ 99 % du fluorure total présent dans le corps se situe dans les tissus calcifiés (c'est-à-dire, les os et les dents) où il se substitue aux ions hydroxyles (OH^-) dans l'hydroxy-apatite pour former la fluoro-apatite [15]. En effet, une partie du fluor absorbé, pouvant atteindre 75 %, peut se déposer dans les tissus calcifiés, le taux le plus élevé ayant été observé chez les enfants qui ont une croissance squelettique active ou chez les individus qui consomment de l'eau potable non fluorée [32]. Si la plupart des auteurs s'accordent à reconnaître cette sélectivité du fluor pour les tissus durs de l'organisme, il n'en demeure pas moins qu'une certaine fixation se fait sur les tissus mous et les organes vitaux et qui a une grande importance physiologique [33]. La dose, la durée d'exposition et le taux de renouvellement des éléments du squelette affectent les concentrations de fluor dans les tissus calcifiés [27,34]. Quoique les concentrations de fluorure dans les os augmentent avec l'âge, la quantité quotidienne retenue est inversement proportionnelle à l'âge; cela est dû à la plus grande aire superficielle des jeunes os hydratés pour la fixation du fluor et à l'augmentation du rapport résorption /formation chez les personnes âgées [35].

En raison de sa grande affinité avec le phosphate de calcium, le fluor est de tous les éléments le plus ostéotrope. Dans les os qui contiennent 96 % de la charge de l'organisme, le fluor entraîne un accroissement de la taille des cristaux d'apatite et diminue leur solubilité [9].

Il faut aussi noter un passage trans-placentaire des fluorures dès la 19^{ème} semaine de gestation [36]. Les échanges entre la mère, le placenta, le fœtus et le liquide amniotique sont importants. Il faut considérer ici le pool mère-fœtus-liquide amniotique dans lequel s'effectue la régulation des mouvements des fluorures [37]. Au niveau du fœtus, les fluorures s'intègrent aux tissus en voie de minéralisation. Les futures dents contiennent plus de fluor si la mère a été supplémentée et ces futures dents temporaires sont alors moins exposées à des caries [37,38].

➤ Elimination

D'une façon générale, pour une absorption régulière, il s'établit un équilibre entre l'absorption et l'élimination urinaire. En l'absence d'autres apports fluorés, la concentration urinaire reflète assez bien la concentration en fluor de l'eau de boisson [9]. Le fluor est donc principalement excrété par l'urine, l'élimination corporelle quotidienne par la transpiration, la salive, le lait maternel et les fèces étant faible [35,39-41]. Cette excrétion comporte une filtration glomérulaire suivie d'une réabsorption tubulaire fonction du pH. Cependant, certains auteurs ont démontré que la rapidité de l'excrétion serait en rapport avec une réabsorption tubulaire relativement faible [33]. Chez les humains adultes, environ 50 à 75% d'une dose orale de fluorure se retrouvent dans l'urine vingt quatre heures après l'ingestion [42-44]. Le fluorure peut être libéré des os par un processus assez rapide d'échange d'ions interstitiel ou par un processus assez lent de remodelage osseux [45].

III-3 FLUOROSE DENTAIRE

Les conséquences les plus immédiates induites par la consommation d'une eau dont la teneur en fluor est très élevée sont la fluorose dentaire et la fluorose osseuse. Selon un rapport de l'UNICEF, la fluorose est endémique dans au moins 25 pays à travers le monde. Ainsi, la fluorose dentaire a été décrite dans de nombreux pays du monde entier : au Maroc, au Kenya, en Tanzanie, au Sénégal, en Inde, en Europe, aux États-Unis particulièrement dans les pays où les populations s'alimentent en eau dont la teneur en fluor est relativement élevée [33].

La fluorose dentaire se définit, d'après T. W. CUTRESS et G. W. SUCKLING [46], comme étant "une hyper minéralisation de l'émail dentaire induite par le fluor à proximité de la dent en développement pendant les phases sécrétoires et/ou de maturation de l'amélogénèse. La sévérité et la distribution dépendent de la concentration en fluor, de la durée d'exposition, du stade de l'activité des améloblastes et de la variation de la susceptibilité de l'individu au fluor " [33].

La fluorose dentaire est due à une ingestion chronique de doses toxiques de fluor (supérieure à 2 ppm) pendant les périodes de formation et de maturation de l'émail. C'est donc au cours de ces processus successifs de minéralisation et de maturation de l'émail que peut avoir lieu la fluorose dentaire. Ce phénomène est rendu possible grâce à l'électronégativité du fluor par rapport aux constituants minéraux de l'émail et de la dentine [33].

Dans les zones à gisements de phosphates, qui peuvent présenter des teneurs très élevées de fluoro-apatite, le fluor peut être à l'origine de fluoroses connues sous le nom de "mottle

enamel" chez les anglo-saxons, et de Darmous en Afrique du Nord. Elles signent les perturbations survenues pendant l'amélogénèse et liées à l'ingestion de quantités élevées de fluor. Elles se caractérisent surtout par des lésions dentaires constituées par des altérations de l'email et plus rarement des lésions gingivales et alvéolaires. L'email peut être tacheté en brun ou en blanc avec des stries, des bandes ou encore présenter l'aspect caractéristique de dents « crayeuses ». Cette forme chronique peut s'aggraver avec une symptomatologie neuro-musculaire et s'accompagner de manifestations gastro-intestinales [9].

L'ingestion excessive de fluor depuis les premières années de l'enfance peut causer des perturbations dans la formation des cellules dentaires, conduisant ainsi à une défectuosité dans l'email [36,46-49]. Sous les formes les plus bénignes, seule la couche superficielle de l'email est touchée et des lignes blanches diffuses apparaissent sur la dent [48]. Lorsque la sévérité augmente, les couches les plus profondes sont touchées et la porosité devient importante, ce qui donne aux dents un aspect blanc crayeux [48,50]. La tache des dents est l'un des symptômes le plus facilement reconnaissable (ANNEXE 2) [51].

En général, les formes légères de fluorose dentaire n'altèrent pas la fonction dentaire et sont considérées comme des problèmes de nature esthétique plutôt que de santé [52], bien qu'une érosion importante de l'email puisse provoquer un mal de dent et une diminution de la capacité de mastication et nécessiter le recours à des procédures de restauration complexes [50].

➤ Cas de fluorose dentaire

Le rapport entre l'ion fluorure et la carie dentaire a été noté pour la première fois dans la première moitié du XX^e siècle lorsqu'il a été observé que les résidents de certaines

. Dans les années 1970, la maladie carieuse a été déclarée par l'OMS troisième fléau mondial. Malgré le recul de l'incidence de la carie dans les pays industrialisés, elle constitue encore aujourd'hui un problème de santé publique [53]. Donc les êtres humains ont à travers l'histoire souffert de la fluorose dentaire mais jusqu'au XX^e siècle la cause de la maladie était inconnue. Etant donné l'étendue du niveau élevé de fluor dans les eaux souterraines dans le Rift, vallée de l'Afrique de l'Est, il est évident que leurs anciens habitants aient été atteints par la fluorose dentaire [51]. Il est estimé qu'en général, 48% des enfants résidant dans les régions où l'eau est fluorée sont affectés par une forme de fluorose; et que 12,5% ont une fluorose d'ordre esthétique [47].

Des études épidémiologiques menées sur différents groupes d'âges d'enfants exposés à différentes concentrations de fluorure dans l'eau potable ont montré que la période de

développement de l'émail la plus sensible pour l'apparition de la fluorose dentaire était le dernier stade de maturation de l'émail plutôt que le stade précoce de sécrétion [36]. Etant donné que les formes légères de fluorose dentaire sont celles que l'on rencontre le plus souvent en Amérique du Nord [54], on pense que les dents antérieures, particulièrement les incisives centrales maxillaires (ICM), sont les plus importantes pour évaluer le risque de fluorose dentaire [36,50,55]. Une analyse menée sur de petits groupes d'enfants d'école de Hong-Kong avant et après la réduction de la concentration de fluorure dans le réseau d'eau potable de la collectivité a conclu qu'il existait un risque minimal pour les ICM avant l'âge de 18 mois, mais que le risque était maximal entre 22 et 26 mois [56]. Une fois que le développement des dents est terminé (c'est-à-dire à 5 ou 6 ans pour les ICM) le risque de fluorose dentaire disparaît [55-57]. Donc les dents primaires sont moins affectées que celles permanentes, et les dents qui se forment lors de la première éruption (les incisives et les premières molaires permanentes) sont moins affectées que celles qui se forment lors de la dernière éruption (les prémolaires et les molaires permanentes) [51]. Un groupe consultatif formé de chercheurs sur la santé dentaire a récemment étudié les données disponibles sur la relation entre l'apport quotidien total de fluorure et la prévalence des caries dentaires et fluorose dentaire chez les enfants [57]. Les données examinées s'étendaient aux études réalisées par DEAN et coll., [58,59] dans les années quarante sur des enfants âgés de 12 à 14 ans de 21 collectivités des Etats-Unis où ils avaient résidé toute leur vie et où l'eau potable contenait naturellement du fluorure, à celles plus récentes réalisées sur des enfants de différents âges de collectivités du Canada, des Etats-Unis, d'Australie et d'autres pays où l'eau était fluorée ou non fluorée [60,61]. Il a été déterminé que les études décisives pour définir la relation dose-réponse entre l'apport quotidien total de fluorure et les caries et la fluorose dentaire étaient celles de DEAN et coll., en y ajoutant les données compilées de 1958 sur des enfants âgés de 12 à 14 ans de 20 collectivités des Etats-Unis [62]. Le groupe a conclu que les anciennes études dose-réponse étaient plus applicables que les études récentes car, dans ces dernières, les plages d'âges des enfants, en raison de leur variation, fournissaient relativement peu de données sur la prévalence de la fluorose et de la carie dentaire dans les collectivités où les concentrations de fluorure dans l'eau potable sont inférieures à 1,0 ppm ; de plus, la plupart de ces études ne prennent pas en compte l'effet de confusion des sources de fluorures qui n'existait pas dans les années quarante (par exemple pâte dentifrice, bain de bouche, gels...) [57].

En ce qui concerne la fréquence de fluorose dentaire, l'analyse des premières données de DEAN et coll. [58,59], a montré que les enfants des années quarante qui consommaient de l'eau potable

contenant une concentration inférieure à 1,6 ppm de fluorure ont présenté de faibles taux de fluorose dentaire très légère (22%) et légère (4%), mais pas de fluorose dentaire moyenne ou sévère [15].

Par exemple au Sénégal, A. RAOULT et coll. [63] dans la région de Thiès (Mont Rolland), zone où la teneur de l'eau en fluor varie de 0,8 à 5,2 mg/L, ont montré que la prévalence de l'atteinte dentaire est de 11,25 % sur un échantillon de 702 enfants [33].

I. BROUWER et A. DE BRUIN [64,65] dans la région de Diourbel et du Sine Saloum ; zones où la teneur de l'eau en fluor varie de 0,1 à 7,4 mg /L, ont montré une prévalence de l'atteinte dentaire chez les enfants de 7 à 16 ans qui varie de 68 % à 100% [33].

Dans une enquête menée à KHAKHAL et NDANG dans la région de Fatick, située au sud-est de Dakar, sur un effectif total de 173 sujets examinés, 24 personnes sont affectées par une fluorose dentaire modérée et 82 par une fluorose dentaire sévère (soit un total de 106 personnes) [33].

Toujours au Sénégal, une étude épidémiologique [66] a permis de mettre en évidence un foyer d'intoxication grave à NIAKHAR, dans la région de Fatick, où l'ensemble des atteintes connues a été observé : taches sur les dents et déformations osseuses. La comparaison des observations faites par l'équipe de l'Orstom (actuel « IRD »), en 1993, avec celles faites dans la même région, au début des années 1960, met en évidence une aggravation des atteintes. En effet, à cette époque aucun signe d'intoxication n'a été décelé en relation avec l'absence de concentrations élevées en ions fluorure dans les échantillons prélevés. En revanche, une récente enquête faite au même endroit a décelé des concentrations en ions fluorure entre 6,0 et 9,5 mg/L. Ces observations sont corrélées à la diminution de la pluviométrie dans la région de Fatick au cours de ces dernières années [21].

La fluorose dentaire a été également étudiée dans les secteurs environnant le Pilanesberg (Afrique du Sud); il a été rapporté dans cette étude que la fluorose dentaire sévère a atteint 28 % de la population tandis que 41 % avait la fluorose dentaire modérée. Des résultats semblables ont été rapportés dans l'étude de Du PLESSIS [67] qui a constaté que 39% des personnes de Bloemfontein (Afrique du Sud) sont atteintes de fluorose dentaire [51].

L'excès de fluor dans l'eau de boisson a été trouvé dans les eaux souterraines et de surface dans plusieurs régions de la Tanzanie. Le problème du fluor dans l'eau de boisson dépassant les recommandations de l'OMS a été localisé dans quelques sources d'eaux de surface et souterraine dans les régions de Arusha, Kilimanjaro, Mwanza, Shinyanga et Singida. Les régions de Mara, Manyara et Mbeya sont confrontées à un excès de fluor dans leurs eaux provenant des puits. Les

cas de fluorose dentaire et osseuse sont sévères dans les régions d'Arusha, Kilimanjaro, Mwanza, Mara, Shinyanga et Singida. D'autres régions qui sont affectées par la fluorose dentaire modérée sont Tanga, Tabora, Kigoma et Dodoma ; en définitive, la Tanzanie est l'un des pays les plus affectés dans le monde [4].

En Chine, on enregistre environ 38 millions de personnes souffrant de fluorose dentaire à cause de la forte teneur de l'eau de boisson en fluor [3,68].

De nos jours, on remarque qu'au Mexique, la fluorose endémique est un problème de santé affectant autour de 5 millions d'habitants [3,69].

Aux Etats-Unis, on estime qu'un enfant sur cinq est atteint de fluorose dentaire et dans certaines régions du pays, le taux est de l'ordre de 70 % [70].

III-4 FLUOROSE OSSEUSE

Encore appelée ostéopathie fluorée ou ostéose fluorée, la fluorose osseuse se définit comme étant une atteinte du squelette liée à une intoxication chronique au fluor. La source de l'intoxication pouvant être hydro tellurique, alimentaire, professionnelle ou médicamenteuse. En effet, les ingestions ou inhalations de doses excessives et surtout prolongées du fluor sont susceptibles d'entraîner à la longue des lésions osseuses, voire articulaires [33].

La fluorose osseuse se manifeste au bout d'un certain nombre d'années (au moins 10 ans) pour des concentrations hydriques au dessus de 4 mg/L. Toutefois, l'incidence globale de l'atteinte osseuse est très variable, parfois sans parallélisme rigoureux avec le taux de concentration de l'eau en fluor, ce qui fait suspecter l'intervention d'autres facteurs individuels tels que la malnutrition ou un apport protéidique insuffisant. La fluorose osseuse se révèle surtout à la radiographie et ses manifestations cliniques sont en général pauvres, inconstantes de même que les anomalies biologiques [33].

Une exposition prolongée et intense, de l'ordre de 10 à 40 mg/j peut être à l'origine de manifestations ostéopathiques susceptibles d'être observées au niveau du squelette [9]. Des douleurs osseuses, un enraidissement articulaire sont les signes de début d'intoxication au fluorure [71]. La fluorose osseuse, précisément dans sa première phase, est une maladie difficile à diagnostiquer et peut être rapidement confondu avec les formes variées d'arthrites incluant les ostéoarthrites et les arthrites rhumatoïdes [47]. A un stade plus avancé, l'augmentation de la masse et des déformations osseuses peuvent entraîner des dysfonctions articulaires et spinales, une atrophie musculaire, des anomalies neurologiques de type compressif [71]. Dans ses phases

avancées, la fluorose peut ressembler à plusieurs maladies osseuses et articulaires tels que : l'ostéosclérose, l'ostéodystrophie rénale, l'ostéoporose et l'hyperthyroïde secondaire... etc. [47]. Dès le début du développement des altérations de la fluorose osseuse, le patient se plaint souvent de malaises dans les membres et le tronc, de douleurs et d'inflexibilité à un stade avancé, principalement dans la zone lombaire. Dans le cas de la fluorose sévère, en plus des problèmes cités ci-dessus, certaines victimes peuvent éprouver des déformations dans les os (ANNEXES 3A, 3B, 3C et 3D) [51].

En effet, les ions fluorures (F^-) remplacent les ions hydroxyles (OH^-) de l'hydroxy-apatite de l'os pour former la fluoro-apatite qui est moins soluble que l'hydroxy-apatite, le principal constituant des os [33]. La substitution des ions (OH^-) par les ions fluorures (F^-) a donc pour conséquence une accumulation du fluor dans le tissu osseux, ce qui se traduit par la fluorose osseuse [51].

Le fluor incorporé dans les os sous forme de fluoro-apatite produit un réseau cristallin qui subit une résorption moindre (c'est-à-dire moins soluble, plus stable) et possède une grande résistance à la compression, mais il est plus fragile et présente une plus faible résistance à la traction [52,72].

Les signes et les symptômes de la fluorose squelettique vont d'une radiographie asymptomatique de la trabécule spinale sous forme préclinique (phase I) à des effets sévères tels qu'une calcification des ligaments, déformations articulaires et spinales, une atrophie musculaire et des anomalies neurologiques observées en cas de fluorose squelettique déformante (phase III) [52].

Les symptômes les plus sévères tendent à toucher la colonne vertébrale dans les parties inférieures et portantes du corps [73]. Les concentrations de fluorure dans la cendre d'os peuvent aller de 3500 à 5500 mg/kg à la phase I de la fluorose squelettique à plus de 8400 mg/kg à la phase III [52]. L'âge, les déficiences nutritionnelles, l'insuffisance rénale, le remodelage osseux ainsi que la dose et la durée de l'exposition au fluorure jouent, eux aussi, un rôle dans l'apparition de la maladie [29,52,74-76].

Par conséquent, les facteurs qui régissent le développement de la fluorose osseuse sont : la consommation de quantités élevées de fluor, l'exposition continue, le travail manuel laborieux, une pauvre nutrition [51], une fonction rénale altérée due à une maladie [77].

La fluorose osseuse se révèle par un certain nombre de manifestations :

➤ Manifestations cliniques

Selon de nombreux auteurs, les lésions osseuses seraient précédées par des troubles musculo-articulaires, neurologiques, respiratoires, gastro-intestinaux, génito-urinaires et dermatologiques.

Toutefois, alors que la fluorose dentaire est facilement reconnaissable, l'atteinte du squelette ne devient évidente qu'à un stade avancé [33].

➤ Manifestations ostéo-articulaires

Au stade précoce, seuls des radiographies du squelette peuvent aider au diagnostic; à un stade avancé, chez l'adulte jeune la fluorose se manifeste par de vagues douleurs osseuses et articulaires concernant les mains, les genoux, les pieds et le rachis. A un stade de plus, il existe une raideur évidente du rachis avec limitation des mouvements et plus tard peut apparaître une cyphose. La marche devient difficile et à ce moment peut apparaître une dyspnée d'effort liée à une diminution de l'ampliation thoracique et même des signes de souffrances médullaires consécutifs à un rétrécissement du canal rachidien. Ces lésions invalidantes surviennent en général dans les formes répondant à des expositions très prolongées et à des doses élevées de fluorure, soit un apport quotidien de 20 à 80 mg de fluorure pendant 10 à 20 ans [33].

La principale anomalie est une ostéocondensation diffuse à la fois endéostale et périostée. Les travées osseuses sont épaissies et se confondent. Les os, en particulier les vertèbres, prennent un aspect marmoréen homogène. L'épaississement périostée modifie les contours qui deviennent irréguliers, avec un aspect hérissé, festonné, ondulé, des cotes et parfois des os longs [33].

➤ Manifestations neurologiques

Elles se définissent comme étant une radiculomyélopathie. Elle a été décrite par plusieurs auteurs dont P. MUKUL [78] à Maharashtra ; J. C. MALOO et coll. [79] en Libye, R. T. HAIMONOT [80] en Ethiopie et enfin par M. R. C. NAIDU et coll. [81] en Inde. Ces atteintes neurologiques apparaissent dans les cas très avancés, à la suite d'une ingestion prolongée de grandes quantités de fluorure pendant au moins 20 ans [33].

Les symptômes se distinguent en manifestations radiculaires et myélopathiques.

- Les manifestations radiculaires

Le principal signe est subjectif et constitué par une acroparesthésie associée à une fonte musculaire et des douleurs irradiant le long des racines nerveuses. On note également une asthénie et une atrophie musculaire importantes, la fonte musculaire résultant en général de l'atrophie due au manque d'exercice. Enfin, des fasciculations et fibrillations musculaires peuvent être associées à la symptomatologie [33].

- Les manifestations myélopathiques

Elles résultent principalement du rétrécissement du canal rachidien par compression de la moelle en un ou plusieurs points. Le premier signe de l'atteinte médullaire est le plus souvent une

faiblesse des deux membres inférieurs qui débute au niveau d'une jambe puis s'étend à l'autre. En général, les symptômes évoluent assez rapidement, gênant et entraînant une restriction progressive de l'activité. Les réflexes tendineux sont habituellement exagérés au niveau des membres et on retrouve souvent une réponse du réflexe cutané plantaire en extension. En réalité, le terme ultime de l'intoxication squelettique est la cachexie fluoritique qui aboutit à la mort de l'individu [33].

➤ Cas de fluorose osseuse

Des manifestations systémiques de la fluorose osseuse ont été décrites : douleurs abdominales, gastrite atrophique, syndromes inflammatoires, déficits immunitaires portant sur l'immunité cellulaire (migration des leucocytes, phagocytose). L'observation d'une fluorose osseuse déformante implique une exposition prolongée et massive au fluor : au moins 10 mg/j pendant au moins 10 ans, ce qui ne s'observe que dans les contextes les plus défavorables [71].

La plupart des études disponibles sur les effets non néoplasiques possibles sur la santé humaine due à l'ingestion prolongée de fluorure se sont concentrées sur les effets nocifs sur le squelette, principalement sur la fluorose squelettique et les fractures. Les données consistent principalement en des études épidémiologiques de populations exposées à différentes concentrations de fluorure dans l'eau, en des études de cas d'individus exposés à une eau contenant de fortes concentrations de fluorure et en des études cliniques de personnes atteintes d'ostéoporose traitées à l'aide du fluorure de sodium (NaF) [15].

Des phénomènes d'ostéoporose ont été signalés chez des sujets ayant consommé pendant de longues périodes de l'eau contenant plus de 6 mg/L de fluor [9]. De même, il a été observé des modifications osseuses chez les malades ayant été dialysés avec de grandes quantités d'eau fluorée et chez des buveurs de thé ayant un long vécu d'insuffisance rénale. Il semble exister une relation plus ou moins linéaire entre la teneur de l'eau en fluorure et la concentration osseuse en fluor. Ainsi, un individu consommant une eau de concentration 1 mg/L présenterait une concentration osseuse de 1000 mg de F⁻ par kg de poudre d'os sec, les sujets buvant de l'eau à 2 mg/L de fluor auraient un taux de 2000 mg de F⁻ par kg de poudre d'os sec et ainsi de suite [9].

Des cas de fluorose osseuse ont été notés dans beaucoup de pays du monde où la concentration de fluor dans l'eau de boisson est en excès par rapport aux recommandations de l'OMS.

Par exemple au Sénégal, dans une étude menée à KHAKHAL et NDANG villages situés dans la région de Fatick, au sud-est de Dakar, sur un échantillon de 202 sujets, il a été trouvé 86 cas de fluorose osseuse [33].

Encore au Sénégal, un examen clinique réalisé chez un cultivateur âgé de 67 ans et habitant à Fimla (région de Fatick) montrait une ankylose vertébrale douloureuse et diffuse ainsi qu'une raideur douloureuse des genoux, des hanches et une fluorose dentaire, connue de longue date. Les mains étaient le siège d'une discrète douleur et d'une tuméfaction au niveau des métacarpo-phalangiennes ; surtout de l'index et du médus. Le bilan radiographique montrait une ostéocondensation diffuse du rachis avec une fusion vertébrale complète, et au bassin un aspect marmoréen. Au niveau de la main, des calcifications insertionnelles capsulaires constituaient des lésions pseudo-ostéophytiques. Les lésions osseuses du squelette axial, la région d'origine du patient, la fluorose dentaire, une consommation en eau de boisson hautement fluorée (6,4 mg/L) depuis plus de 40 ans ont permis de retenir le diagnostic d'ostéose fluorée [82].

Toujours au Sénégal, un tailleur de 63 ans habitant à Thiadiaye (région de Thiès) est consulté le 18 février 1992 au CTO actuel Hôpital Général de Grand Yoff (HOGGY) pour une tuméfaction peu douloureuse des doigts accompagnée d'une importante gêne à la préhension au niveau des deux mains depuis trois mois. L'installation a été progressive et spontanée, marquée par des douleurs digitales mais surtout une gêne à la fermeture complète de la paume de la main. Cette gêne était concomitante à une tuméfaction dorsale et latérale des doigts et du dos de la main (ANNEXE 3A). Cette déformation plus gênante que douloureuse était à l'origine de l'arrêt de son activité professionnelle. Par ailleurs, il présentait des arthralgies lombaires et des douleurs osseuses (tibia, avant-bras). Il a été retrouvé dans ses antécédents une notion d'ingestion prolongée de plus de 30 ans d'eau de boisson richement fluorée et une fluorose dentaire. L'examen clinique retrouvait une déformation caricaturale bilatérale de la main [82].

L'atteinte de la main par la fluorose osseuse reste une situation inhabituelle. Au Sénégal, la première description est attribuée à RAOULT [63] en 1957. Depuis cette date, de nombreuses études, surtout odonto-stomatologiques mais aussi épidémiologiques ont signalé la fréquence de cette ostéopathie toxique. L'intoxication est, en effet, en rapport avec une ingestion prolongée (supérieure à 10 ans) d'une eau de boisson hautement fluorée dans quatre régions du pays. La fluorose de la main a été retrouvée chez deux patients exposés depuis plus de trente ans avec une eau renfermant en moyenne plus de 6 mg/L de fluorure. La localisation de la fluorose osseuse au niveau des os courts de la main mérite d'être connue car, à côté du préjudice esthétique, elle est responsable dans sa forme ostéo-périostée d'une importante gêne à la préhension. Elle doit en effet, faire l'objet d'une attention clinique et radiographique au cours des études épidémiologiques sur la fluorose. Cette dernière pose un véritable problème de santé publique dans certaines régions du Sénégal [82].

Un autre exemple concerne le Niger où cinq mille enfants souffrent de déformations osseuses après avoir été exposés à une eau contenant des doses excessives de fluor. Jambes et dos arqués, tête disproportionnée par rapport au corps, os fragilisés, dents rougeâtres et friables ont été observés. Les déformations osseuses chez les enfants étaient déjà signalées en grand nombre par les médecins en 1997. La "catastrophe" a été causée par la présence naturelle d'une quantité excessive de fluor dans l'eau de boisson. Un an après que les spécialistes eurent commencé à observer des cas en quantité, un premier rapport interne de la société nationale des eaux du Niger (SNE) constatait, dans la nappe phréatique qui alimente Tibiri, à 600 km de la capitale, un taux de fluorure de deux à trois fois plus élevé que le maximum recommandé par l'organisation mondiale de la santé (OMS) [83].

Selon une enquête menée en Avril 2001 par le centre de santé de Tibiri, 4918 garçons et filles auraient été victimes d'une insouciance quant au choix du lieu du forage pour alimenter les puits de la région. La consommation d'eau contaminée aurait créé une déformation du bassin, qui rend impossible tout accouchement; ainsi les jeunes filles atteintes qui sont aujourd'hui en âge de procréer ne peuvent donner la vie, ce qui se traduit par des générations entières sacrifiées [83]. C'est dans ce cadre que l'association Nigérienne pour la défense des droits de l'homme (ANDDH) a animé un point de presse sur l'intoxication de plus de 400 enfants à Tibiri (Maradi), suite à la consommation de l'eau fournie par la SNE aux habitants de cette localité. Le président de l'ANDDH a révélé le caractère nocif de l'eau consommée par les populations de Tibiri et son impact sur la santé humaine, surtout celle des plus jeunes enfants (déformations de squelettes, déformations et fragilisation de l'os du crâne et des dents). En effet, la consommation de l'eau fournie par la SNE dans cette localité provoque une terrible maladie identifiée sous le nom de fluorose ostéo-dentaire. Elle est due au taux très élevé de fluor dans le site qu'exploite cette société à Tibiri. La teneur de cette eau en fluor est de l'ordre de 4,77 à 6,6 mg/L contre 1,5 mg/L préconisée par l'OMS. L'intoxication aux fluorures entraîne la déformation des membres inférieurs et rend l'enfant complètement infirme. Elle fragilise l'os du crâne, noircit et détruit les dents. L'enfant ainsi atteint, est condamné à rester invalide jusqu'à la fin de ses jours ; tout geste provoque chez lui des douleurs atroces ; le moindre déplacement sans aide lui est impossible. Les examens cliniques et paracliniques effectués sur les différents patients confirment le caractère réel des déformations constatées chez les enfants [83].

Des études effectuées sur des populations humaines consommant une eau de boisson fluorée ont montré une relation entre la fluorose dentaire et l'augmentation de la fracture des os chez les

enfants; et aussi entre une consommation à long terme d'une eau fluorée et une augmentation de la fracture de la hanche dans un certain âge [47].

Selon les estimations, en Chine, on attribue plus d'un million de cas de fluorose osseuse à l'eau de boisson [68].

Une étude d'un journal médical britannique rapporte que les vieilles femmes blanches habitant les communautés où l'eau est fluorée ont un pourcentage de fracture des poignets supérieur à 32 % [84].

Cependant, il y a des rapports contradictoires sur la prédominance des fractures d'os liées à l'ingestion à long terme de fluorure dans l'eau potable. Une étude a été effectuée dans six zones rurales de la Chine pour examiner la prévalence de la fracture d'os chez des populations exposées à des niveaux de fluor variant de 0,25 à 7,97 ppm. Des données concernant des antécédents médicaux et l'information démographique, des fractures d'os, le niveau de fluor dans l'eau potable, l'activité physique, le tabagisme, l'alcoolisme et des ingestions diététiques ont été rassemblées. Un effectif total de 8266 sujets mâles et femelles âgés de plus de 50 ans ont été divisés en six groupes selon les concentrations en fluorure dans l'eau potable. Les effectifs des sujets répartis dans différents groupes avec différents niveaux de fluorure (0,25-0,34 ; 0,58-0,73 ; 1,00-1,06 ; 1,45-2,19 ; 2,62-3,58 et 4,32-7,97) sont de 1363, 1407, 1370, 1574, 1051 et 1501 respectivement comme donné dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2: répartition des personnes en fonction de la concentration de l'eau de boisson en fluorure selon Y. Li et coll. [85].

niveaux de fluorure (ppm)	0,25-0,34	0,58-0,73	1,00-1,06	1,45-2,19	2,62-3,58	4,32-7,97
Effectif concerné	1363	1407	1370	1574	1051	1501

Les résultats de l'étude sont rassemblés dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3: pourcentage des personnes atteintes de fracture d'os en fonction de la concentration de l'eau de boisson en fluorure selon Y. Li et coll. [85].

Niveaux de fluorure (ppm)	0,25-0,34	0,58-0,73	1,00-1,06	1,45-2,19	2,62-3,58	4,32-7,97
Fracture globale (%)	7,41	6,40	5,11	6,04	6,09	7,40
Fracture de la hanche (%)	3,01	2,21	1,31	1,65	1,43	3,66

Un modèle en U a été décrit pour la relation entre la prévalence de la fracture d'os et le niveau de fluorure dans l'eau de boisson. La prévalence de la fracture globale de l'os était plus faible chez les populations exposées à 1,00-1,06 ppm de fluorure dans l'eau de boisson que chez celles exposées à des niveaux de fluorure supérieurs ou égal à 4,32 ppm et inférieurs ou égal à 0,34 ppm. La plus forte présence de la fracture de la hanche était dans le groupe avec une exposition plus élevée de fluorure dans l'eau (c'est-à-dire 4,32-7,97 ppm). Basé sur les données rassemblées dans cette étude, il a été conclu que l'exposition à long terme de fluorure dans l'eau de boisson supérieure à 4,32 ppm augmente le risque aussi bien de la fracture globale de l'os que de la fracture de la hanche [85].

Un certain nombre d'études épidémiologiques de type corrélation écologique ou géographique ont examiné les associations possibles entre la survenance de fractures (principalement les fractures de la hanche chez les personnes âgées) et l'exposition des populations à l'eau potable fluorée [15]. Les études de ce type peuvent présenter un certain nombre de faiblesses, comme un manque d'information sur l'apport de fluorure (c'est-à-dire, apport provenant d'autres sources, telles que les aliments, les produits dentaires... etc.) chez les collectivités où l'eau est fluorée et chez les collectivités témoins. Il y a aussi les différences géographiques pour divers facteurs (consommation de tabac, mode de vie, exposition dans l'environnement et le milieu de travail, caractéristiques génétiques... etc.) qui pourraient jouer un rôle dans la survenance des fractures. Les migrations incontrôlées de population entre les régions où l'eau est fluorée et les collectivités témoins et une variation géographique de la qualité du diagnostic et de la déclaration de la maladie constitue des obstacles pour mener à bien ces études [52,86,87].

Lors d'une étude menée aux Etats-Unis, une comparaison du taux d'hospitalisation pour fracture de la hanche (de 1985 à 1986) chez les hommes et les femmes âgés de plus de 65 ans de 216 comtés (eau fluorée) où l'eau potable contenait une concentration de 0,7 à 1,2 mg/L, de 1,3 à 2,0 mg/L, de 2,1 à 3,9 mg/L ou supérieure à 4,0 mg/L de fluorure et de 95 comtés (eau non fluorée) où l'eau potable contenait une concentration inférieure à 0,4 mg/L de fluorure a été faite. Les ratios comparant les taux de fracture de la hanche dans les comtés où l'eau était fluorée avec ceux des comtés où l'eau n'était pas fluorée ont augmenté de 1,016 pour les comtés où l'eau contenait 0,7 à 1,2 mg/L de fluorure à 1,224 pour les comtés où l'eau contenait une concentration supérieure à 4,0 mg/L, mais ils n'ont été significatifs que pour les comtés où les plages de concentration de fluorure étaient de 1,3 à 2,0 mg/L ou plus [88].

MAY et WILSON [89] ont constaté que le taux de fracture de la hanche chez les hommes et les femmes âgés de plus de 65 ans dans chacun des 438 comtés où la population était supérieure à 100.000 était positivement corrélé avec la fraction de la population recevant une eau potable fluorée (jusqu'à 1,0 mg/L de fluorure). Toutefois, une analyse complémentaire de 51 comtés n'a montré aucune relation entre le taux de fracture de la hanche et la durée d'exposition, le taux de fracture étant le plus élevé dans les comtés où la durée d'exposition à l'eau fluorée ne dépassait pas dix ans, plus faible de 20 % dans les comtés où la durée d'exposition allait de onze à dix huit ans et intermédiaire dans les comtés où la durée d'exposition dépassait dix huit ans [89].

D'autres études menées aux Etats-Unis n'ont montré aucun signe de fluorose squelettique après une consommation pendant 10 ans et à vie d'eau potable contenant des concentrations de fluorure respectives de 1,2 et 3,3 mg/L à 6,2 mg/L [77,90-92]. Lors d'une étude plus ancienne réalisée au Texas, il a été signalé des signes radiographiques d'ostéosclérose mais aucun signe clinique de fluorose squelettique chez 18 % des personnes d'une petite ville (Bartlett) ayant consommé de l'eau de boisson contenant 8 mg/L de fluorure pendant 37 ans en moyenne, alors que, dans une ville témoin (Cameron) où l'eau contenait 0,4 mg/L de fluorure, le taux d'atteinte n'a été que de 4 % de la population [93]. Les radiographies de résidents du Texas et de l'Oklahoma ayant consommé de l'eau contenant 4 à 8 mg/L de fluorure ont indiqué 23 cas d'ostéosclérose liée au fluor mais aucun cas de fluorose squelettique [94].

Lors d'un examen des études radiographiques disponibles, KAMINSKY et coll. [75], ont conclu qu'aux Etats-Unis chez les individus ayant consommé de l'eau contenant une concentration inférieure à 4,0 mg/L de fluorure, on n'avait observé aucun signe des altérations squelettiques associées à la fluorose squelettique [15].

La fluorose endémique liée à la présence d'un excès de fluor dans l'eau de boisson est un problème de santé publique dans la plupart des états en Inde. Environ 25 millions de personnes de 150 quartiers sont atteintes par cette endémie. En Inde, les eaux souterraines constituent l'essentiel de la source d'eau de boisson aussi bien dans les zones urbaines que rurales. Plus de 90 % de la population rurale utilise l'eau souterraine à des fins domestiques. Cependant près de 300 millions de personnes vivent constamment dans une pauvreté absolue dans les zones urbaines comme dans celles zones rurales; et sont privées d'accès à une eau de boisson propre et une santé durable. Les problèmes liés au fluor s'étendent largement dans environ 9 états. Presque 66 millions de personnes sont confrontées aux risques de maladies "hydriques" dont 6 millions sont des enfants [95].

III-5 FLUOR ET CERVEAU

La capacité du fluor à détériorer le cerveau représente aujourd'hui l'un des domaines de recherche le plus actif sur la toxicité de cet élément [47]. Etant donné les niveaux élevés de fluorure dans plusieurs aliments et sur l'eau d'approvisionnement, il s'est avéré urgent que des études soient menées pour voir s'il n'y a pas un lien entre le fluor et des troubles dans le développement et le fonctionnement du système nerveux central chez les animaux de laboratoire et les humains [8].

La recherche, enclenchée par de récentes études sur des humains en Chine, a révélé une relation entre l'exposition aux niveaux élevés de fluor et une réduction de la capacité cognitive chez les enfants [8]. La découverte des effets neurotoxiques chez les personnes exposées au fluor est compatible avec les résultats récents sur plus de trente études faites sur des animaux de laboratoire et qui sont publiées depuis 1992. Les études sur les animaux ont aussi mis en évidence une documentation considérable sur les effets toxiques directs sur le tissu cérébral, même à des doses aussi faibles que 1 ppm de fluorure dans l'eau [47]. Les effets de l'excès de fluor dans l'eau de boisson sur les fonctions cérébrales de souris ont été étudiés. Les méthodes utilisées sont les mesures des capacités d'assimilation et de mémorisation de souris exposées à un niveau élevé de fluor et des souris témoins en utilisant le test comportemental toxicologique (Shuttle box test) et l'activité du cholinestérase (ChE) dans le tissu cervical homogène des souris. Les résultats ont montré que les capacités d'assimilation et de mémorisation des souris exposées à des doses élevées de fluor étaient nettement plus faibles que celles des souris témoins, tandis que l'activité du ChE dans le cerveau des souris exposées aux concentrations élevées de fluor était supérieure que celle des souris témoins. Les auteurs de l'étude ont conclu que l'excès de fluor dans l'eau de boisson peut baisser les fonctions cérébrales des souris, le fluor est par conséquent considéré comme neurotoxique [96]. Ainsi, les études faites sur des animaux ont montré des déficits dans le développement de la connaissance et de la mémoire chez les groupes traités avec du fluor [47].

Etant donné que la majorité des études faites sur les souris, en ce qui concerne plusieurs maladies, et qui présentait des résultats positifs sur ces dernières se révélaient aussi positifs sur les humains, une hypothèse selon laquelle l'excès de fluor dans l'eau de boisson est neurotoxique a été émise et vérifiée par plusieurs études. Ainsi, K. ROHOLM [97] a noté que "l'homme est beaucoup plus sensible au fluorure que le rat". Des études effectuées sur des rats ont révélé ainsi des changements significatifs sur les effets du fluor dans le système nerveux central.

MULLENIX et coll. [98] ont trouvé une neurotoxicité chez les rats exposés aux fluorures causant un déficit sexuel et comportemental pour une dose spécifique.

D'autres études de YANG et coll. [99] et PANG et coll. [100] ont mis en évidence les effets défavorables du fluor sur le cerveau [8].

L'exposition d'une femme enceinte à des niveaux élevés de fluorure a un effet défavorable sur la fonction cérébrale du fœtus et sur les neurotransmetteurs [96,101-103].

La baisse de l'intelligence chez les enfants est associée à des quantités élevées de fluorure dans les aliments ou dans l'eau de boisson [104-107].

Nous donnons, dans ce qui suit, les résultats d'une étude portant sur l'effet de l'excès de fluorure dans l'eau de boisson sur l'intelligence des enfants de certaines écoles chinoises.

Cette étude a été entreprise sur 118 enfants, âgés de 10 à 12 ans, fréquentant l'école de Tianjin Xiqing District en Chine. Les enfants sur lesquels les études ont été faites ont vécu pendant longtemps dans deux villages dont les populations ont des modes de vie similaires; la seule différence étant la concentration de fluor dans l'eau de boisson.

La méthode d'échantillonnage ayant été prise au hasard, 60 enfants sont choisis dans la région à teneur élevée de fluorure ($3,15 \pm 0,61$ mg/L) dans l'eau de boisson et 58 enfants choisis dans la région où la teneur en fluor dans l'eau de boisson était faible ($0,37 \pm 0,04$ mg/L). Les enfants ayant une affection congénitale ou des désordres neurologiques ont été exclus de l'étude. Pour mener à bien les études et tirer une conclusion entre la concentration de fluorure dans l'eau de boisson et les effets sur l'intelligence des enfants, le quotient intellectuel (Q.I.) des enfants a été mesuré dans les deux échantillons et des comparaisons ont été effectuées.

Le Q.I. a été mesuré avec le Chinese Combined Raven's Test. Les sept catégories de quotient intellectuel distinguées sont données dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4: correspondance entre les valeurs de Q.I. et l'attribution du niveau intellectuel selon Y. Lu et coll. [8].

Quotient intellectuel (Q.I.)	Attribution du niveau intellectuel
<70	Retardé (faible)
70-79	Limite (en dessous de la limite)
80-89	Sensiblement normal (faiblement moyenne)
90-109	Normal (moyenne)
110-119	Nettement normal (au dessus de la moyenne)
120-129	Supérieur (bon)
>129	Très supérieur (excellent)

Des facteurs de confusion possibles ont été étudiés en soumettant des questionnaires que les parents des enfants ont complétés sous la direction d'examineurs. Les catégories de questions concernant les enfants sont :

- Une maladie antérieure;
- L'âge;
- Le sexe;
- L'histoire de la résidence.

Les questions concernant le passé des parents incluait des informations sur une maladie dans le passé, le statut économique-social, le niveau d'instruction, le tabagisme et l'alcoolisme. Les résultats obtenus révèlent que les niveaux de fluor dans l'urine des enfants habitant la région où la concentration de fluorure dans l'eau de boisson était élevée sont significativement supérieurs que ceux des enfants habitant la région où l'eau de boisson était faiblement fluorée comme l'indiquent les valeurs du tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5: niveaux de fluor et Q.I. des enfants habitant dans les régions à forte et faible concentration de fluor dans l'eau de boisson selon Y. Lu et coll. [8].

Niveau de fluor dans l'eau de boisson ([F] $\pm$ Δ [F]) (mg/L)	Effectif des enfants examinés	Niveau de fluor dans l'urine (mg/L)	Valeur du quotient intellectuel (Q.I. $\pm$ Δ Q.I.)
Elevé (3,15 $\pm$ 0,61)	60	4,99 $\pm$ 2,57 *	92,27 $\pm$ 20,45 ⁺
Faible (0,37 $\pm$ 0,04)	58	1,43 $\pm$ 0,64	103,05 $\pm$ 13,86

*Comparaison des niveaux de fluor dans l'urine avec Welch's aternate t-test, qui ne prend pas en compte les variations égales, t=10,40 avec 66 degrés de liberté, P< 0,0001.

+ Comparaison du Q.I. avec Welch's aternate t-test, $t=3,36$ avec 104 degrés de liberté, $P < 0,005$.

Le pourcentage d'enfants qui sont dans la catégorie de Q.I. retard ou limite est nettement supérieur chez les résidants de la zone à forte concentration de fluorure dans l'eau de boisson que ceux habitant la région à faible teneur en fluor dans l'eau de boisson comme le révèle les résultats du tableau 6 ci-dessous [8].

Tableau 6: distribution des notes de Q.I. pour les enfants habitant dans les régions à forte et faible concentration de fluor dans l'eau de boisson selon Y. Lu et coll.

niveau de fluorure dans l'eau	Q.I. < 70	Q.I. 70-79	Q.I. 80-89	Q.I. 90-109	Q.I. 110-119	Q.I. 120-129	Q.I. > 129
Elevé	5 * (8,3 %)	8 * (13,3 %)	12 (20,0 %)	26 (43,3 %)	5 (8,3 %)	3 (5,0 %)	1 (1,7 %)
Faible	0 (0,0 %)	2 (3,4 %)	6 (10,3 %)	30 (51,7 %)	13 (22,4 %)	5 (8,6 %)	2 (3,4 %)

*Comparaison du pourcentage d'enfants qui sont dans la catégorie de Q.I. retardé et limite (<70-79) avec celui des enfants de la catégorie de Q.I. de sensiblement normal, normal, nettement normal, supérieur et très supérieur (80-89>129) avec Fischer's exact test, $P < 0,005$ [8].

La conclusion de cette étude révèle que le fluor peut produire la destruction biochimique et changer le fonctionnement du développement du cerveau humain. De plus, le niveau élevé de fluorure dans les urines résultant de l'ingestion d'une grande quantité de ce dernier dans l'eau de boisson a été confirmé dans l'étude. En revanche, l'intelligence était inversement reliée au niveau de fluor dans l'eau de boisson et dans les urines [8].

En effet les résultats de cette étude corroborent ceux des recherches qui ont été entreprises antérieurement [104,105] et suggèrent l'existence d'une relation entre l'exposition aux fluorures et l'intelligence.

III-6 FLUOR ET GLANDE PINEALE

Dans les années 1990, il a été découvert que la glande pinéale constituait un site important d'accumulation de fluor dans l'organisme, avec une concentration de fluorure plus élevée que dans les dents ou les os [47].

Des études ultérieures menées sur des animaux ont montré que l'accumulation du fluor dans la glande pinéale peut réduire la synthèse des glandes mélatonines, une hormone qui favorise la régulation du début de la puberté. Les animaux traités avec du fluor se sont retrouvés avec une réduction de la circulation de la mélatonine et un début tardif de la puberté que ceux non traités avec du fluor [47].

III-7 FLUOR ET GLANDE THYROIDE

La question des effets toxiques des fluorures sur la thyroïde a toujours posé des problèmes. En effet, des enquêtes démographiques menées aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et ailleurs ont montré que la consommation d'une eau de boisson contenant du fluorure naturel ou ajouté n'altère pas la fonction thyroïdienne et ne modifie ni la structure histologique, ni la morphologie de la glande. La fonction thyroïdienne n'est pas altérée même lorsque la consommation d'eau contenant 6 à 7 ppm de fluorure est poursuivie pendant toute l'existence. Cependant, certains auteurs pensent qu'à des taux de fluorure supérieurs à 12 mg/L dans l'eau de boisson, l'état de la thyroïde et le métabolisme de l'iode sont affectés. D'autres auteurs ont quant à eux montré l'action du fluor à forte dose, sur les parathyroïdes et sur le pancréas [33].

Bien avant les années 1970, en Europe et en Amérique du Sud, des composés inorganiques fluorés ont été utilisés pour traiter les patients atteints d'hyperthyroïdie. Le fluor a été utilisé parce qu'un constat a permis de noter une réduction effective de l'activité de la glande thyroïdienne, même à des doses aussi faibles que 2 à 5 mg/j. Aujourd'hui, beaucoup de personnes vivant dans les communautés où l'eau est fluorée consomment une dose de fluor allant de 2 à 5 mg/j pour réduire l'activité de la thyroïde chez les malades atteints d'hyperthyroïdie dont les symptômes sont : obésité, léthargie, dépression et maladie cardiaque [47,108-113].

III-8 FLUOR ET REINS

Les reins jouent un rôle vital dans la prévention d'une accumulation excessive du fluor dans le corps. Chez les individus bien portants, les reins excrètent approximativement 50 % de la prise journalière de fluor. Par contre chez les individus atteints de maladie rénale, la capacité d'excrétion des reins devient remarquablement insuffisante, entraînant une accumulation du fluor

dans le corps. Il est évident que les personnes atteintes de maladies rénales ont une grande susceptibilité cumulative des effets toxiques du fluor [47]. En effet, chez les personnes souffrant d'insuffisance rénale, le fluor en s'associant à d'autres éléments chimiques, forme des complexes difficiles à filtrer par les reins. Un cas inquiétant de l'effet du fluor réside sur le fait que, quand il est accumulé dans le système osseux, il peut causer ou exacerber l'ostéodystrophie rénale, une maladie des os rencontrée habituellement chez des personnes atteintes de problème rénal avancé. En plus, le fluor est considéré comme un poison de la fonction rénale à des doses élevées avec une exposition à court terme aussi bien chez les animaux que chez les humains. L'impact des faibles doses de fluor, avec une exposition à long terme, a été suffisamment étudié. Aussi, une récente étude menée sur des animaux de laboratoire par des chercheurs de l'US Environmental Protection Agency, a montré qu'une exposition de juste 1 ppm de fluor cause un déficit rénal chez des rats s'ils y sont exposés pendant une longue période [47]

III-9 FLUOR ET ESPACE GASTRO-INTESTINAL

Chez les personnes hypersensibles au fluor, les maladies gastro-intestinales ont été produites par l'ingestion d'une quantité de fluor aussi faible que 1 mg ; une dose facilement dépassée par les personnes vivant dans les régions fluorées. Une simple ingestion d'une faible quantité de fluor d'environ 3 mg dans des essais cliniques contrôlés soigneusement, a causé des dégâts à la muqueuse gastrique chez des volontaires adultes et bien portants [47]

III-10 FLUOR ET CANCER

Une nouvelle recherche Américaine révèle que les garçons ayant été exposés au fluor entre l'âge de 5 et 10 ans souffriront d'un plus grand taux d'ostéosarcome, le cancer des os, lorsqu'ils seront âgés de 10 à 19 ans [114].

Les risques accrus de cancer et les niveaux d'exposition au fluor, aux Etats-Unis et en Grande Bretagne, ont été identifiés dans une nouvelle étude disponible à l'école de la santé dentaire à Havard. C'était la première étude concernant le lien entre l'exposition au produit chimique à la période critique du développement d'un enfant et l'âge du début du cancer des os [114,115].

Bien que l'ostéosarcome soit rare, affectant seulement environ 3% de cancers d'enfants, il est particulièrement dangereux. Le taux de mortalité dans les cinq premières années est environ 50%, et presque tous les survivants se font amputer les membres, généralement les jambes [114].

Cette recherche a été rendue disponible par the Environmental Working Group (EWG), une organisation de recherche basée à Washington. Le groupe affirme qu'il a assemblé de fortes

évidences et a demandé que le fluor de l'eau de robinet soit ajouté à la liste classifiée du gouvernement des USA parmi les substances connues ou prévues pour causer le cancer chez l'homme [114].

III-11 FLUOR ET REPRODUCTION

Plusieurs chercheurs ont étudié les effets des doses relativement élevées de NaF administrées dans l'eau potable ou dans l'alimentation sur la fonction de reproduction d'animaux de laboratoire. Lors d'une étude au cours de laquelle des souris swiss-webster femelles sevrées ont reçu une alimentation contenant un faible niveau de fluorure (0,1 à 0,3 ppm) et une eau potable contenant jusqu'à 200 ppm de fluorure (environ 40 mg/kg p.c. par jour provenant de l'eau potable) pendant cinq semaines avant et pendant la période de reproduction, la croissance maternelle, la survie et la production des portées ont été réduites ou entravées [116]. Une étude portant sur plusieurs générations de souris n'a montré aucune différence significative dans la fonction de reproduction de femelles ayant reçu une alimentation contenant une concentration inférieure à 5,2 ou 100 ppm de fluorure [117]. Il n'a été signalé aucune gestation ou implantation d'embryon chez des groupes de souris swiss-albinos aux quelles on avait administré par voie orale une dose de fluorure de 5,2 ou 17,3 mg/kg p.c. par jour du sixième au quinzième jour suivant l'accouplement [118].

On a également signalé que l'administration par voie orale de fluorure d'environ 4,5 à 200 mg/kg p.c. par jour avait divers effets nocifs sur les organes de reproduction, tels un arrêt de la spermatogénèse et une baisse du nombre de spermatozoïdes dans le canal déférent et de la densité de cils épithéliaux de l'épididyme chez les lapins [119]. Il a été aussi noté une augmentation du poids de la vésicule séminale et de la prostate, une diminution de la taille des cellules épithéliales germinales des testicules et des cellules épithéliales de la queue, de la tête de l'épididyme chez les souris [120,121] et l'absence de maturation des spermatocytes ainsi qu'une dégénérescence et une nécrose des tubules séminifères chez les souris [122].

Les études portant sur les effets de l'ingestion de fluorure sur la croissance de la reproduction menées sur des humains ont consisté en diverses études cas-témoins et écologiques qui ont examiné les associations possibles entre l'exposition à l'eau potable fluorée ou à des suppléments de fluorure durant la grossesse et les effets nocifs sur la fonction de reproduction ou sur le développement du fœtus. Dans trois études cas-témoins, on n'a constaté aucune association entre l'absorption de fluorure et une augmentation des avortements spontanés [123], des maladies

congénitales du cœur [124] ou d'issues défavorables de grossesses tardives, tels que des malformations congénitales, des mortinaissances et décès [125].

Une récente étude écologique qui a examiné l'indice synthétique de fécondité annuel (ISF) chez les femmes âgées de 10 à 49 ans dans 30 régions des Etats-Unis a montré que deux fois plus de régions comprenant des comtés où la concentration de fluorure dans l'eau était égale ou supérieure à 3 ppm ont présenté des associations négatives significatives entre l'ISF et l'exposition aux fluorures tout comme des associations positives. Bien que les résultats régionaux d'une méta-analyse aient montré une association négative combinée ISF/exposition, les auteurs ont précisé que les mesures de l'exposition et les résultats pouvaient différer d'une femme à une autre et des associations positives significatives ISF/exposition dans certaines régions indiquaient la possibilité de confusion due à des facteurs inconnus [126]. Lors d'une étude clinique, on a constaté que des enfants dont les mères avaient été exposées à une eau fluorée en recevant des suppléments de fluorure (1 mg/j) pendant la grossesse étaient légèrement mais sensiblement plus lourds et plus grands à la naissance et présentaient moins de malformations congénitales que ceux dont les mères avaient consommé de l'eau fluorée mais n'avaient pas reçu de supplément [127].

III-12 FLUOR ALLERGIE ET HYPERSENSIBILITE

Certains individus sont allergiques et hypersensibles au fluor. La plupart des essais cliniques montrent que 1% des individus exposés à une dose de 1 mg/j de fluor sont exposés à des réactions allergiques et hypersensibles telles que réactions des cutanées, des troubles gastriques et des maux de ventre [47].

En plus des affections induites par l'excès de fluorure dans l'eau de boisson qui ont été citées ci-dessus, on peut également noter que l'exposition au fluor perturbe la synthèse du collagène et mène à sa carence dans les os, les tendons, les muscles, les cartilages, les poumons et la peau [128-133]. Le fluor perturbe aussi le système immunitaire et engendre la dégénérescence des tissus sains, augmentant de facto la croissance de tumeurs chez les individus sensibles [134-139]. Bien qu'on ne puisse affirmer que le fluor joue un rôle dans l'apparition du diabète, il est important de savoir le danger auquel sont exposées les personnes diabétiques de boire de l'eau fluorée. Il est évident que ces dernières boivent beaucoup plus d'eau en général; en effet, la teneur de 1 ppm considérée comme optimale est basée sur le fait qu'un apport de 1 mg de fluor par jour n'est pas nocif, mais si une personne boit 3 litres d'eau fluorée par jour l'intoxication est inévitable [140].



PROCEDES DE TRAITEMENT DES EAUX FLUOREES

IV PROCEDES DE TRAITEMENT DES EAUX FLUOREES

Nous venons de voir dans ce qui précède les nombreuses maladies causées par l'ingestion de quantités élevées de fluor dans l'eau de boisson et les problèmes de santé publique qu'elles engendrent dans beaucoup de pays à travers le monde. Nous avons aussi pu constater que les conséquences les plus immédiates de la consommation d'une eau très riche en fluor sont les fluoroses dentaire et osseuse. Ainsi, le meilleur moyen de limiter l'intoxication fluoritique, véritable problème de santé publique dans les pays touchés, serait de traiter l'eau de boisson en tant que principal vecteur [21].

IV-1 ETAT DE L'ART

Il existe diverses méthodes de traitement pour réduire ou éliminer les fluorures dans les eaux, surtout celles destinées à la boisson. Les techniques de défluoruration des eaux sont de deux sortes : les procédés chimiques (précipitations, adsorption) et les procédés à membrane (Résines échangeuses d'ions, électrodialyse, nanofiltration, osmose inverse...) [21].

IV-1-1 LES PROCEDES CHIMIQUES CLASSIQUES

➤ Précipitation

Les procédés de précipitation sont basés sur la formation de composés insolubles à partir des ions fluorures contenus dans l'eau à traiter [6]. La formation de composés insolubles à partir des éléments indésirables par action des réactifs appropriés est très utilisée en traitement d'eau.

Ce sont généralement des considérations de cinétique de précipitation qui vont conduire à l'agencement des appareillages utilisés pour ce type de traitement. Les différentes étapes cinétiques étant une période de germination, une période de précipitation proprement dite et la séparation des précipités formés. Les installations de traitement devront être conçues pour augmenter au maximum ces trois vitesses et réaliser le maximum d'opération dans le même appareillage [141].

La méthode de traitement la plus courante est la précipitation du fluorure de calcium provenant soit de la chaux, soit du chlorure de calcium [51]. Une masse donnée d'un réactif est introduite dans la solution d'eau à traiter et le mélange est agité pendant un temps déterminé. Au terme de cette agitation, le mélange est laissé au repos avant d'être soumis à la filtration.

Le problème fondamental de l'utilisation de la chaux résulte de la faible solubilité de l'hydroxyde de calcium, ce qui nécessite un excès de réactif pour compléter la précipitation. La solubilité relativement grande du fluorure de calcium (CaF_2) ne permet cependant pas une élimination complète des ions fluorures (F^-). La base de chaux pour l'élimination du fluor peut être améliorée

en utilisant de la mixture de chaux et du chlorure de calcium. La grande solubilité du chlorure de calcium (CaCl_2) fournit plus de calcium que la chaux sans augmentation de pH. Les coûts d'élimination du fluor par la chaux et par la mixture de chaux et de CaCl_2 étant pratiquement identiques [51].

La technique de précipitation a été effectuée sur une eau d'un forage de Fatick (Sénégal), avec différents composés (chaux, carbonate de calcium, nitrate de calcium, oxyde de magnésium + adoucissement avec 5,0 g/L de chaux, alun de potassium, alun d'ammonium, sulfate d'aluminium, acétate d'aluminium et chlorure d'aluminium) afin de voir celui qui est plus efficace pour l'élimination du fluor. Les résultats des essais réalisés sur 200 ml d'eau de Fatick montrent que les sels d'aluminium présentent un intérêt pratique, car donnant les plus faibles teneurs de fluor résiduel. L'oxyde de magnésium donne aussi un résultat satisfaisant (0,65 mg/L) mais ce résultat intéressant est contrebalancé par des manipulations supplémentaires (adoucissement par exemple) et un pH final supérieur à 10 [142].

L'utilisation des sels d'aluminium comme agents de défluoruration semble être efficace pour l'élimination de l'excès de fluor dans l'eau par la méthode de précipitation. En effet, le traitement de l'eau de Fatick qui, initialement avait une concentration en fluor de 5,2 mg/L, par 0,75 g/L de sulfate d'aluminium a permis d'obtenir une eau renfermant moins de 1 mg/L de fluor [142].

La grande teneur en aluminium du polychlorosulfate basique d'aluminium, sa présentation sous forme liquide et son grand pouvoir flocculant ont amené NDAO et coll. [143] à comparer son pouvoir défluorurant à celui du sulfate d'aluminium. Le polychlorosulfate basique d'aluminium ($\text{Al}_n(\text{OH})_m(\text{SO}_4)_k \text{Cl}_{(3n-m-2k)}$) a en phase aqueuse un caractère cationique marqué. Bien que d'un coût assez élevé, il présente une efficacité coagulante par rapport aux matières colloïdales 1,5 fois supérieure à celle du sulfate d'aluminium à dosage égal en ions Al^{3+} et son pouvoir flocculant est également plus important [141]. Néanmoins, si l'on se réfère à la masse d'agent défluorurant nécessaire pour abaisser la teneur en fluorure à 1 mg/L, la capacité de défluoruration du sulfate d'aluminium technique ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{ H}_2\text{O}$) apparaît 50 à 60 % supérieure à celle du polychlorosulfate d'aluminium. MAZOUNIE [144] a aussi montré que pour une concentration initiale en fluorure donnée, la capacité de fixation, à pH constant, diminue pour des doses croissantes d'aluminium. Cependant le fluor résiduel décroît avec l'augmentation du sel d'aluminium utilisé dans les mêmes conditions d'essais. Ces essais mettent en jeu des quantités importantes de produits pour obtenir une eau potable. Il faut par exemple 430 g de Sulfate d'aluminium par m^3 d'eau à traiter pour réduire la concentration en fluorure d'une eau de forage

de Fatick (Sénégal) de 3,9 à 1 mg/L; soit pour une production journalière de 700 m³, la masse de 9,030 tonnes par mois [141].

➤ Co-précipitation

La co-précipitation, appelée aussi technique Nalgonda est le procédé par lequel des sels d'aluminium (chlorure d'aluminium et sulfate d'aluminium) sont ajoutés aux eaux de boisson contaminées par le fluor.

Ce procédé est utilisé dans trois systèmes :

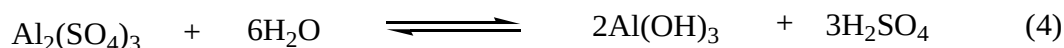
- Un système intégré d'un seau pour un usage à l'échelle familial :

Ce système a été utilisé pour la première fois en Tanzanie. Deux composés chimiques que sont le chlorure d'aluminium (AlCl₃) et le sulfate d'aluminium Al₂(SO₄)₃ sont simultanément ajoutés à un seau d'eau brute et agités avec une baguette en bois. De la chaux est ajoutée pour ajuster le pH de l'eau à environ 6,7. Après l'ajout des réactifs chimiques, on laisse la solution reposer près d'une heure. Ce procédé est convenable pour un usage au quotidien où un seau d'eau d'environ 20 litres est traité par jour. Ce procédé produit de l'eau dont la teneur en fluor résiduel est comprise entre 1 et 1,5 mg/L [51].

En effet, lorsqu'on ajoute un sel d'aluminium à une solution contenant des fluorures, il se produit d'abord une hydrolyse de l'aluminium suivant la réaction (3) suivante :

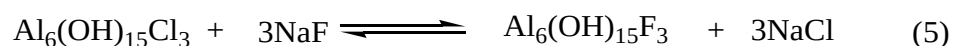


Le sulfate d'aluminium est fréquemment utilisé comme coagulant minéral. L'action coagulante résulte de l'hydrolyse qui suit sa dissolution selon la réaction (4) ci-dessous:



Dans les deux cas, cela provoque une acidification de la solution. En présence de fluorures, il y a co-précipitation de l'hydroxyde d'aluminium. Il se produit alors des oxyfluorures AlOF ou plus probablement Al₆(OH)₁₅F₃. La solution obtenue est débarrassée de ses fluorures, mais est acidifiée et chargée en d'autres anions venant du sel d'aluminium ajouté [21].

Avec le polysulfate d'aluminium, qui est déjà partiellement hydrolysé, l'augmentation de la salinité et de l'acidité est moins importante [21].



Le pH jouant un rôle très important dans les phénomènes de coagulation-floculation, il est nécessaire de se placer dans la zone de pH correspondant au minimum de solubilité des ions métalliques du sel utilisé. Pour les sels d'aluminium, c'est pour un pH compris entre 6 et 7 que le minimum d'ions Al^{3+} reste en solution [141].

- Un système de remplissage et de drainage pour un usage à l'échelle communautaire :

Ce système a également été utilisé en Tanzanie pour une défluoruration des eaux de boisson. Il consiste en un récipient cylindrique équipé d'un mécanisme d'agitation manuel. L'eau brute est aspirée dans un réservoir et les quantités d'alun, de chaux et de poudre de javel nécessaires y sont ajoutées. Les mélanges sont agités doucement pendant dix minutes et laissés au repos au bout de 2 heures. L'eau défluorurée surnageante est drainée et approvisionnée à travers des postes de desserte fixes [51].

- Un système d'approvisionnement en eau à l'échelle de plusieurs communautés :

Un grand système de défluoruration est utilisé pour desservir de larges communautés. Ce système nécessite la combinaison des procédés de défluoruration utilisant l'alun et la chaux.

La technique Nalgonda a été utilisée par plusieurs pays notamment l'Inde, le Kenya, la Tanzanie et le Sénégal. Cette méthode présente cependant un certain nombre d'inconvénients tels qu'une efficacité de traitement d'environ de 70 % ; limitant l'application de la technique à des eaux peu chargées en fluor, une utilisation de grandes quantités de sulfate d'aluminium (700-1200 mg/L) et les effets néfastes des espèces d'aluminium dissous dans l'eau traitée [51].

➤ **Avantages :**

L'avantage de la précipitation est qu'elle permet, avec l'utilisation des sels d'aluminium, d'abaisser la teneur du fluor à des valeurs inférieures à 1 mg/L pour les eaux faiblement fluorées et donc de répondre aux normes de potabilité [142].

➤ **Inconvénients :**

Ces procédés sont souvent difficiles à mettre en œuvre, ils sont généralement discontinus et nécessitent une décantation après la coagulation-floculation [141]. Compte tenu de la faible insolubilité des fluorures, il est difficile d'effectuer des traitements par précipitation de fluorures

insolubles pour le traitement des eaux potables. En plus, ces méthodes nécessitent une maintenance, des investissements importants et coûteux (ouvrages de génie civil, installations de séparation...) [21]. Il faut également noter que les réactions de précipitation engendrent la production d'un grand volume de boue et nécessitent des quantités élevées de réactifs, ce qui se traduit naturellement par une augmentation du coût de l'eau distribuée aux populations. Un autre inconvénient de la méthode de précipitation est la présence d'ions indésirables. Par exemple, l'utilisation du Sulfate d'aluminium aboutit à des concentrations de Sulfate comprises entre 101 et 389 mg/L, parfois très proches de la limite de potabilité (400 mg/L). Le polychlorosulfate d'aluminium, grâce à son pouvoir flocculant, ne modifie pas la teneur en sulfate mais accentue en revanche la charge en chlorures (plus de 18 à 28 %) par rapport à l'eau brute [141].

➤ **Adsorption**

Les procédés d'adsorption constituent un moyen très utilisé pour l'élimination de l'excès de fluor dans l'eau. Ces procédés utilisent le passage de l'eau contenant du fluor à travers une couche de matériau [145]. Ils mettent en œuvre essentiellement un phénomène de physisorption très rapide qui peut être suivi, du fait de la diffusion dans les pores, d'un phénomène de fixation chimique beaucoup plus lent [21]. Le fluorure est éliminé par échange d'ion ou par réaction chimique avec l'adsorbant [145]. En effet, les fluorures ont la propriété de s'adsorber sur différents composés minéraux comme l'apatite ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaCO_3) où l'ion carbonate peut être remplacé par les ions fluorures pour donner la fluoro-apatite insoluble, mais également sur l'alumine, le charbon actif, la chaux enrichie de magnésie et aussi des poudres d'os ou des charbons d'os... etc.

Les traitements consistent donc en une adsorption sur des oxydes ou des hydroxydes, avec une forte influence du pH, ou encore en une permutation d'ions avec des anions (phosphates, carbonates...) [21]. Les facteurs jouant un rôle important dans le mécanisme d'adsorption sont le temps de contact, le pH, la salinité, la concentration initiale de fluor et la compétition ou l'interférence entre le fluor et d'autres espèces chimiques capables d'être adsorbées [145].

Pour mener l'expérience d'adsorption, une dose déterminée d'adsorbant est pesée et introduite dans un flacon avec la solution d'eau à traiter. L'ensemble est agité à la température ambiante pendant un temps défini comme étant le temps de contact. La solution est ensuite recueillie puis filtrée. Les expériences peuvent aussi être effectuées sur des colonnes remplies d'adsorbant en faisant passer l'eau à traiter à travers la colonne.

Les critères de choix d'un adsorbant convenable sont le coût du matériau, la facilité de l'opération, la capacité d'adsorption, le potentiel de réutilisation, le nombre de cycles utiles et la

possibilité de régénération [51]. La chaux est l'un des agents chimiques le moins utilisé pour l'élimination du fluor des eaux usées. Toutefois, il est possible de réduire le niveau de fluor jusqu'à 1 mg/L en utilisant uniquement la chaux.

SKRIPACH et coll. [146] ont proposé un schéma pour l'élimination du fluor par lequel de larges quantités de fluor sont éliminées par réaction avec l'oxyde de calcium, suivie d'une réaction avec le superphosphate et l'oxyde de calcium ou le sulfite d'aluminium pour l'élimination du fluor résiduel [145]. Les méthodes d'adsorption sont souvent appropriées pour des concentrations de fluor relativement faibles qui sont obtenues après réduction du niveau de fluor dont les teneurs varient de 10 à 20 mg/L par l'utilisation des méthodes de précipitation [145].

➤ Cas d'adsorption avec le charbon actif, l'alumine activée et la bauxite activée

Lors d'une étude effectuée par CHOI et CHEN [145], plusieurs adsorbants (charbon actif, alumine activée, et bauxite activée) ont été utilisés pour l'élimination du fluor.

Dans cette étude, trois solutions de base distinctes ont été utilisées pour l'étude de l'adsorption :

- eau distillée déionisée (DDW : deionized-distilled water)
- eau de mer propre (SW : seawater) filtrée à travers un filtre de 0,05 µm.
- Eau reconstituée (SGW : simulated geothermal water) contenant des quantités de calcium et de magnésium négligeables.

Dans une étape préliminaire de l'étude, 9 adsorbants classés dans trois types d'adsorbants que sont les charbons actifs, les aluminés activés et les bauxites activées, donnés dans le tableau 7, ont été examinés pour un test du pourcentage d'adsorption dans la solution d'eau distillée déionisée précédemment citée.

Tableau 7: adsorbants utilisés pour l'étude préliminaire de défluoruration selon Choi et Chen.

Charbons actifs	Aluminés activés	Bauxites activées
1 : hydro Darco 3000	5 : Oxyde d'aluminium	8 : Por Ocel
2 : Filtrasorb 300	6 : Alcoa F-1	9 : Milwhite
3 : Nuchar VW-L	7 : KA-201	
4 : Norit		

Après les études du taux d'adsorption, les adsorbants 1, 2, 6 et 9 ont été sélectionnés pour la suite des expériences. L'effet du pH, de la salinité, de la concentration initiale de fluor et de la présence d'autres espèces chimiques sur la capacité d'adsorption des quatre adsorbants choisis a

été étudié sur les trois solutions distinctes en faisant varier leurs concentrations en fluor de 5 à 200 mg/L. Un temps de contact de 48 h a été choisi en supposant que l'équilibre approximatif est atteint au bout de ce temps [145].

Les études menées sur le taux d'adsorption montrent que celui-ci est complet au bout de 12 h environ, indépendamment du type d'adsorbant. La quantité de fluor adsorbée au-delà de 12 h n'augmente pas significativement l'efficacité de l'élimination du fluor.

➤ Effets du pH sur l'élimination du fluor.

Les résultats des expériences montrent que l'intervalle du pH optimal ne change pas avec la composition de la solution pour un adsorbant donné. Pour toutes les solutions et les adsorbants, le pH optimal pour l'élimination du fluor est proche de 7. En plus, les efficacités de l'élimination du fluor par la bauxite activée (adsorbant 9) et l'alumine activée (adsorbant 6) par rapport au pH optimal ne sont pas affectées par la composition des solutions. Par contre, celles du charbon actif (adsorbants 1 et 2), pour la solution SW et la solution SGW, diminuent notablement par comparaison à l'efficacité de l'élimination du DDW. Cette diminution peut résulter des différentes affinités chimiques des ions fluorures et les surfaces des sites d'adsorption. C'est-à-dire les sites du charbon actif peuvent avoir moins d'affinité pour le fluor comparativement à la bauxite activée et à l'alumine activée ; ce qui fait que l'élimination est plus grande pour les deux dernières citées [145].

➤ Effets de la salinité sur l'élimination du fluor

Les résultats expérimentaux obtenus avec les solutions SW et SGW montrent que la salinité n'a aucun effet sur l'élimination du fluor par la bauxite activée et l'alumine activée tandis qu'elle a des effets significatifs sur le charbon actif. Toutefois, ces effets ne sont significatifs qu'à partir d'une certaine valeur de la salinité (1 g/kg pour le SW et 4 g/kg pour le SGW). D'autres augmentations de la salinité produisent un petit effet qui peut indiquer la compétition des ions fluorures avec des espèces chimiques adsorbables par certains sites actifs du charbon actif, tandis que pour d'autres sites, l'ion fluorure est préférentiellement adsorbé. Le manque d'effets significatifs de la salinité à partir d'une certaine limite montre que la plupart des sites en compétition sont occupés. Les résultats montrent que l'efficacité de l'élimination du fluor pour les adsorbants 1 et 2 diminue avec l'augmentation de KCl ou NaCl; tandis que les adsorbants 6 et 9 ne sont pas affectés. L'absence d'effets de la salinité sur l'efficacité de l'élimination du fluor par la bauxite activée et l'alumine activée montre que les sites d'adsorption de ces dernières sont spécifiques aux ions fluorures [145].

➤ Effets de la concentration initiale en fluor

L'efficacité de l'élimination du fluor par les adsorbants (1 et 2) du charbon actif diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration initiale en fluorure. Les adsorbants de la bauxite activée (9) et de l'alumine activée (6) ne sont affectés que pour des concentrations de fluor supérieures à 80 mg/L; toutefois, l'efficacité de l'élimination diminue à mesure que la concentration continue d'augmenter. En général, l'efficacité de l'élimination est grande pour les faibles concentrations initiales en fluor. La bauxite activée et l'alumine activée sont tous les deux des adsorbants efficaces et ont une bonne capacité d'élimination du fluor. Le charbon actif n'est pas en général efficace pour l'élimination du fluor. Cependant, il y a quelques exceptions car l'adsorbant 1 peut éliminer efficacement les fluorures des solutions ayant une concentration inférieure à 10 mg/L avec des niveaux de salinité faibles [145].

➤ Effets de la compétition entre les fluorures et d'autres anions

Les résultats des expériences montrent que tous les adsorbants, excepté la bauxite activée, sont affectés par la silice dissoute dans l'élimination du fluor. L'adsorbant qui subit le plus l'effet de la silice est l'adsorbant 2. En effet, l'adsorption des électrolytes et des non électrolytes dépend de la présence d'impuretés introduites pendant la fabrication des matériaux. Des adsorbants contenant des ions tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} et Fe^{3+} sont plus ou moins spécifiques aux fluorures comparés à ceux qui n'en contiennent pas. Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité de l'élimination du fluor diminue avec l'augmentation des ions SO_4^{2-} pour les adsorbants 1 et 2 du charbon actif, tandis que la bauxite activée et l'alumine activée ne sont pas affectées. Les ions fluorures (F^-) et sulfates (SO_4^{2-}) ont une grande affinité pour les ions métalliques aux surfaces de la goethite et de la gibbsite [147]. Cependant, l'affinité du fluorure pour les métaux est plus grande que celle du sulfate car les complexes du fluor sont plus stables que ceux du sulfate. Pour cette raison, la bauxite activée et l'alumine activée ne sont pas affectées par la présence de SO_4^{2-} , alors que la faible attraction des ions fluorures par les sites d'adsorption à la surface des adsorbants solides ou non métalliques produit un effet de compétition qui diminue l'efficacité de l'élimination [145].

Les résultats de l'étude montrent que la bauxite activée et l'alumine activée sont plus efficaces pour l'élimination du fluor que le charbon actif. L'intervalle relativement large du pH optimum (4,9-8,0) de l'alumine activée constitue un avantage. La diminution rapide de l'efficacité de l'élimination du fluor par la bauxite activée ou l'alumine activée en dehors de cette intervalle de pH indique que les deux adsorbants peuvent être facilement régénérés par de l'acide ou de la

base. L'élimination du fluor par la bauxite activée et l'alumine activée n'est pas affectée par la salinité, la présence d'autres espèces telles que le sulfate (SO_4^{2-}), la silice (SiO_2) [145].

Les prix approximatifs de la bauxite activée (adsorbant 9) et de l'alumine activée (adsorbant 6) sont respectivement 0,04\$/kg et 0,82\$/kg. Donc, même si la performance de la bauxite activée est inférieure à celle de l'alumine activée, elle est recommandée pour le traitement grâce à son coût plus abordable. Dans cette étude, le charbon actif n'est pas convenable pour l'élimination du fluor à cause de son intervalle de pH optimal étroit (5,9-6,0), de sa faible capacité d'élimination et des effets de la compétition due à la présence d'autres espèces chimiques et de l'effet de la salinité [144].

➤ Cas d'adsorption avec d'autres matériaux naturels

Dans une autre étude entreprise par CHIDAMBARAM et coll. [148] un essai d'élimination du fluor a été effectué en utilisant des matériaux naturels tels que le sable rouge, le charbon, la brique d'argile, la cendre volatile et la serpentine. Chaque matériau a été introduit dans une colonne avec un volume donné puis les capacités de défluoruration ont été étudiées en respectant un temps (0-120 minutes). Selon leur capacité de défluoruration, ces matériaux ont été combinés proportionnellement dans une colonne verticale pour améliorer l'élimination. Une solution d'eau de concentration en fluor égale à 10 mg/L est versée à travers la colonne et la variation de l'élimination du fluor pour un flux donné a été étudiée et une tentative de classification des matériaux [148].

Les résultats montrent que le charbon non traité semble ne pas avoir d'effets sur la concentration du fluor avec le temps car l'adsorption du fluor est seulement de 0,5 mg/L. La brique d'argile et la cendre volatile donnent une élimination rapide du fluor de 10 à 5 mg/L ; presque 50 % de cette réduction a lieu au bout de 30 minutes. Le sable rouge adsorbe 9 mg/L de fluor immédiatement après 15 minutes. Au bout de 30 minutes, la concentration de fluor passe de 1,0 à 0,1 mg/L et puis la réduction continue jusqu'à 0,02 mg/L entre 90 et 120 minutes. Pour la serpentine, l'élimination du fluor est maximale entre 0 et 15 minutes, mais sa capacité de défluoruration est plus faible comparée à celle du sable rouge [148].

Les observations montrent qu'après un temps de 30 minutes, l'élimination du fluor est réduite à cause de la saturation des sites d'échange d'ions, ce qui se traduit par une augmentation progressive de la concentration en fluor dans la solution recueillie.

Deux colonnes cylindriques de hauteur 25 cm chacune ont été conçues par combinaison des différents matériaux dans le but d'optimiser l'efficacité de l'élimination du fluor par ces

matériaux. Ces deux colonnes sont conçues de la même manière avec une hauteur identique, seules les épaisseurs des différentes couches de matériaux à l'intérieur des colonnes constituent leur différence [148].

Les épaisseurs des différentes couches sur les deux colonnes sont indiquées sur la figure 1 suivante :

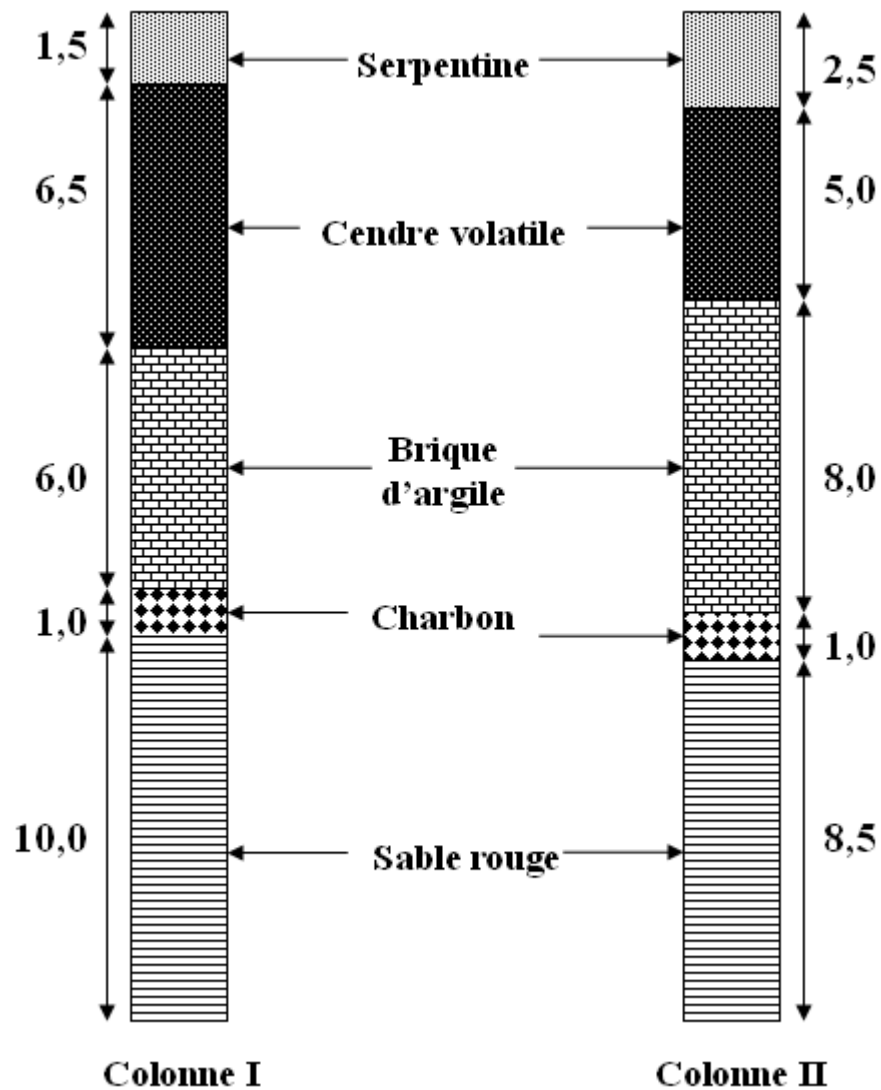


Figure 1: colonnes avec différentes couches de matériau.

La colonne II est différenciée de la colonne I par une quantité supérieure de brique d'argile et de serpentine. La colonne II a un taux d'élimination du fluor plus grand que la colonne I. Dans la colonne II, la quantité de sable rouge et de cendre a été réduite dans le but d'augmenter l'élimination d'une bonne quantité de fluorures. Dans la mesure où le charbon a une faible

capacité d'élimination du fluor, seule une petite quantité de celui-ci a été utilisée dans les deux colonnes avec la même épaisseur [148].

Les résultats de l'étude sur les cinq matériaux ont permis de faire la classification suivante selon leur capacité de défluoruration : sable rouge > brique d'argile > serpentine > cendre volatile > charbon [148].

C. KAILASH et coll. [149] ont étudié une méthode d'adsorption basée sur le développement d'un flux direct à travers une colonne de défluoruration, nécessitant une simple régénération une fois qu'elle est saturée. Les études de défluoruration ont été menées sur des colonnes avec un support matériel dans un mode flux descendant et le procédé est appelé méthode KRASS [149, 150]. Par la suite, un essai a été fait pour développer un filtre domestique convenable pour une famille des zones rurales. La concentration résiduelle en aluminium de l'eau traitée a été mesurée et comparée à celle obtenue par les méthodes Nalgonda (NA) et Alumine Activée (AA). Une analyse détaillée du coût de ces procédés a aussi été effectuée [149].

Deux colonnes en PVC de 5 cm de diamètre et 64 cm de longueur pour l'un et, 6 cm de diamètre et 122 cm de longueur pour l'autre, fonctionnant continuellement en mode flux descendant ont été utilisées pour les expériences de défluoruration. Une eau de robinet à laquelle du fluorure de sodium (NaF) a été rajouté pour obtenir des teneurs en fluor variant de 3,1 à 20,1 mg/L, généralement trouvées en Rajasthan (état à l'ouest de l'Inde), a été utilisée pour l'étude de l'influence de la concentration de fluor [149].

Les résultats de l'étude montrent que la capacité d'élimination du fluor augmente légèrement avec l'augmentation de la concentration initiale en fluor et du pH dans une certaine mesure. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 8 ci-dessous :

Tableau 8: capacité d'élimination du fluor avec l'augmentation à la fois de la concentration initiale de fluor et du pH de l'eau selon Kailash et coll.

Concentration initiale de fluor (mg/L)	pH	Capacité d'élimination (mg/kg)
9,17	4,89	865
11,6	7,00	1430,00
11,5	7,5	1433,00
11,73	7,72	1831,00
12,14	7,797	1903,00
13	8,15	1441,75

La capacité maximale d'élimination du fluor est observée pour une concentration initiale de fluor comprise entre 11,5 et 12,5 mg/L et un pH de l'eau variant de 7,0 à 8,0. Le pH de l'effluent était initialement voisin de 4 mais augmente progressivement vers le pH de l'eau brute avec la continuité de l'écoulement. Au début de l'opération, le pH était de 4 à 5 mais à mesure que l'écoulement progressait, le pH augmentait graduellement pour atteindre la valeur de 6,9 à 7,1 au moment où la concentration du fluor dans l'effluent était inférieure à 2 mg/L [149].

Le TDS de l'effluent était initialement après le début de l'expérience supérieur à celui de l'eau brute mais après un traitement d'environ 1 litre d'eau, le TDS diminue de 50 à 80 % par rapport à celui initial [149].

L'eau traitée à travers une colonne d'alumine activée renfermait une concentration d'aluminium variant de 0,1 à 0,3 mg/L alors que dans l'eau traitée par la méthode KRASS, après rejection de 10 % de l'eau initiale en cycle, l'aluminium est réduit en traces [149].

Les expériences menées sur un filtre de 22 cm de diamètre montrent que la capacité maximale d'élimination du fluor du matériau régénéré est atteinte pour une eau fluorée de 11,28 mg/L et un pH de 7,47. Cette capacité est réduite à 50 % avec la réduction de la concentration initiale de fluor à 6,23 mg/L. La capacité d'élimination du fluor du matériau régénéré est augmentée par diminution progressive de la quantité de la solution de régénération par exemple de 267 à 250 mg/kg de matériau. Le pH de l'eau initialement recueillie était environ de 5 donc légèrement supérieur à la valeur du pH initial à l'entrée de la colonne. Par rejection de l'effluent d'eau initial, le pH de l'eau traitée peut être supérieur à 6 pour une concentration de fluor voisine de 1,5 mg/L [149].

Une eau brute de concentration initiale en fluor variant de 6,23 à 11,3 mg/L et un pH de 5,12 à 8,37 peut être traitée avec un filtre domestique par la technique KRASS par régénération avec une solution d'alun à 10 % pour les différentes concentrations, tandis que dans la technique NA,

la dose d'alun et de chaux dépendent de la concentration en fluor de l'eau brute. La dose d'alun et de chaux augmente avec l'augmentation de la concentration et de l'alcalinité de l'eau brute. La dose d'alun peut être facilement régulée dans la technique KRASS. Avec l'augmentation de la dose d'alun, la concentration d'aluminium résiduel augmente aussi; des valeurs supérieures à 6,86 mg/L ont été notées [149].

Dans la méthode de l'AA une régénération acide ou basique difficile et une concentration d'aluminium inacceptable (0,1 à 0,3 mg/L) a été notée tandis que dans la méthode KRASS la concentration d'aluminium est ramenée à des traces et que la régénération est facile à effectuer. Par conséquent, l'utilisation de la technique KRASS permet d'éliminer l'excès de fluor sans limitations majeures notées pourtant dans les autres procédés et ce nouveau procédé s'avère très facile pour un usage domestique [149].

Les coûts du traitement de 1 litre d'eau par les méthodes KRASS, AA et NA sont donnés dans le tableau 9 suivant :

Tableau 9: prix du litre d'eau traitée selon les techniques KRASS, AA et NA selon Kailash et coll

Technique	KRASS	AA	NA
Prix du traitement F CFA	27,55	47,22	24,92

La méthode KRASS permet de conclure que l'élimination de l'excès de fluor dans l'eau de boisson par l'utilisation d'un support matériel à bas prix, avec la régénération par une solution d'alun à 10 % est possible. L'utilisation du filtre domestique est très facile et peut être manipulé par n'importe qu'elle adulte d'une maison. Seules des traces d'aluminium sont notées dans cette technique; tandis que des concentrations d'aluminium supérieures à 7 mg/L sont notées dans la technique NA et supérieures à 0,3 dans celle AA. Le coût de la technique KRASS est abordable, presque identique à celui de la technique NA et inférieur à celui de AA [149].

➤ **Avantages :**

Les méthodes d'adsorption sont faciles à mettre en œuvre. Dans le cas de l'alumine activée, l'intervalle relativement large du pH optimum constitue sans doute un avantage. En effet, la diminution rapide de l'efficacité de l'élimination du fluor en dehors de cet intervalle de pH indique qu'une régénération par de l'acide ou de la base peut être facilement opérée [145]. Les matériaux d'adsorption sont souvent disponibles localement à des coûts abordables et permettent aussi de réduire considérablement l'excès de fluor dans l'eau de boisson.

➤ Inconvénients :

L'utilisation de grandes quantités du réactif adsorbant est un facteur limitant cette méthode. De plus, l'adsorption n'est efficace que pour les eaux peu chargées en fluor. La nécessité de régénérer le matériau par de l'acide et/ou de la base est aussi un obstacle en plus de la libération d'ions indésirables dans la solution traitée.

L'estimation du coût du traitement par les méthodes chimiques se chiffre aux alentours de 280 FCFA le mètre cube [6].

IV-1-2 LES PROCEDES PHYSICO-CHIMIQUES

➤ **Les résines échangeuses d'ions**

Les résines échangeuses d'ions constituent également une technique d'élimination de l'excès de fluor. C'est un procédé qui utilise des résines ioniques ayant une certaine affinité pour l'ion fluorure. Les résines échangeuses d'anions sont souvent peu spécifiques car elles fixent mieux les ions monovalents OH^- et les divalents SO_4^{2-} que les ions F^- [6]. Ce fait n'est pas souhaitable en défluoruration et provoque un surdimensionnement de réactifs de régénération [21].

➤ Inconvénients :

On note une faible fixation des ions fluorures même sur des résines anioniques fortes. En effet, il n'existe pas de résine spécifique aux fluorures limitant ainsi cette technique pour la défluoruration. De plus, le coût du traitement par les résines échangeuses d'ions est élevé, puis estimé à 355 FCFA le mètre cube [6], et donc cette méthode n'est pas couramment utilisée comme moyen de traitement des eaux fluorées.

Les procédés à membranes tels que l'électrodialyse (ED), l'osmose inverse (OI) et la nanofiltration (NF) sont devenus récemment les méthodes développées pour l'élimination du fluor en excès dans les eaux saumâtres destinées à la consommation [51]. La coupe d'un module spiralé simple de membrane est montrée en ANNEXE 4. Les procédés à membrane ont l'avantage de pouvoir se passer de réactifs chimiques et d'une étape de régénération. Des expériences de défluoruration d'eaux de boisson ont été menées en mettant en œuvre les procédés d'électrodialyse (ED), d'osmose inverse (OI), et plus récemment, de nanofiltration (NF) [21].

Des paramètres tels que le facteur de concentration volumique (FCV) et le taux de rétention (TR) en ions fluorure, très utilisés, sont définis dans les relations ci-dessous :

$$FCV = \frac{V_0}{V_R} = \frac{V_0}{(V_0 - V_p)} \quad (6)$$

$$TR = \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) \times 100 \quad (7)$$

V_0 : volume initial de l'eau brute.
perméat.

C_p : concentration du fluor dans le

V_R : volume du retentât.
brute.

C_0 : concentration du fluor dans l'eau

V_p : volume du perméat.

➤ L'électrodialyse (ED)

C'est un procédé de séparation mettant en œuvre un champ électrique. Les espèces à extraire sont séparées de la solution à épurer par migration sélective des ions à travers des membranes à perméabilité sélective (membranes échangeuses d'anions : A_1 et A_2 , perméables aux anions ou membranes échangeuses de cations : C_1 et C_2 , perméables aux cations) [6]. Le schéma de principe est illustré sur la figure 2 suivante :

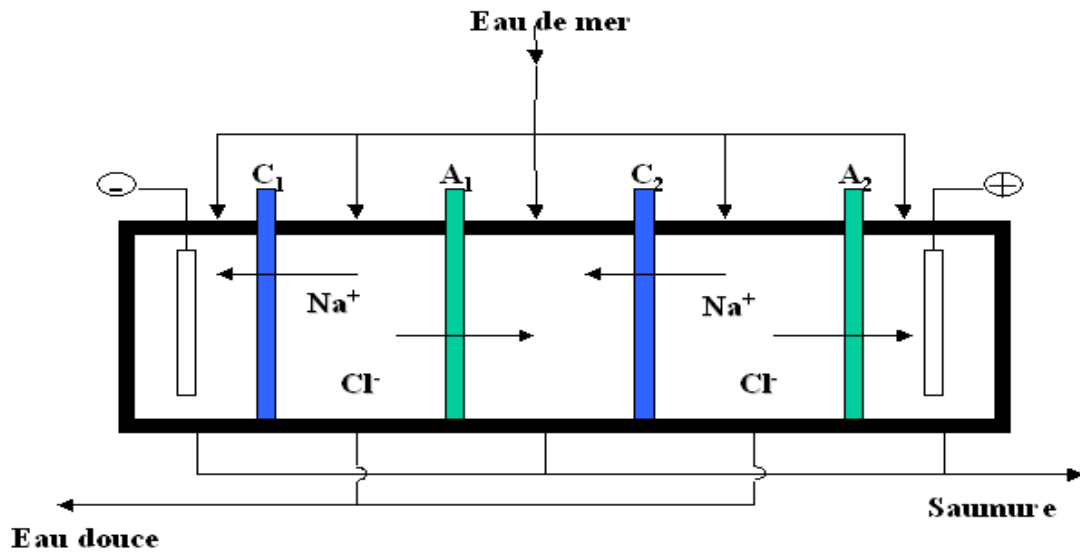


Figure 2 : schéma illustratif de fonctionnement de l'électrodialyse.

A_1 et A_2 : membranes anioniques.

C_1 et C_2 : membranes cationiques.

Les électrodialyseurs sont construits suivant un montage de type « filtre-presse » comportant alternativement des compartiments de concentration et de déconcentration. Sous l'action du champ électrique, les sels contenus dans les solutions à traiter sont transférés des compartiments de déconcentration vers les compartiments de concentration. On obtient alors d'un côté, une saumure surconcentrée et, de l'autre, une eau diluée. Il est possible de choisir la salinité finale de

l'eau traitée qui est fonction du courant imposé et du temps de séjour de l'eau dans l'appareil ; une reminéralisation de l'eau après traitement n'étant donc pas nécessaire [6].

Les électrodes qui fournissent le courant d'alimentation de l'électrodialyseur sont le siège de réactions électrochimiques. Un circuit de rinçage par recirculation entre les compartiments anodiques et cathodiques permet d'éviter le dépôt des corps formés [141].

Cette technique de membrane a été la première utilisée (dans les années 1960) ; elle est surtout intéressante pour le traitement des eaux saumâtres ; le coût énergétique de l'électrodialyse étant directement fonction de la quantité de sel à éliminer. Les installations sont généralement de petite et moyenne taille et sont souples d'utilisation, mais le niveau de technicité nécessaire à la bonne conduite du procédé reste élevé.

Jusqu'ici, les membranes classiques d'électrodialyse avaient une plus grande affinité pour les ions chlorure que pour les ions fluorures, limitant ainsi leur application à la défluoruration des eaux saumâtres, car avant d'enlever un équivalent d'ions fluorures, il fallait enlever tous les ions chlorures de la solution à traiter, ce qui nécessitait une étape supplémentaire de reminéralisation et donc un impact sur le coût du traitement.

Dans certaines régions du Maroc, la concentration de l'eau excède les concentrations standards en fluor et est parfois saumâtre. Le recours à la méthode de dilution qui a été utilisée pour réduire l'excès de fluor s'étant avéré inefficace, l'office national de l'eau potable du Maroc (ONEP) a initié des études d'élimination du fluor par l'utilisation des procédés à membranes, en l'occurrence l'électrodialyse [151].

Les études ont été effectuées sur deux membranes échangeuses d'anions (NEOSEPTA ACS et AXE 01) dans la région de N'zalet Laadem où la concentration de l'eau en fluor est de 1,8 ppm [151]. La comparaison de la performance de ces deux membranes pour l'élimination du fluor a été faite en utilisant des paramètres tels que le taux de rétention spécifique (TRS) en fluor, sulfate et le taux de rétention global (TRG) dont les expressions sont données par les relations suivantes :

$$\text{TRS} = \left(1 - \frac{[\text{Ion}]_t}{[\text{Ion}]_0} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$\text{TRG} = \left(1 - \frac{[\text{TDS}]_t}{[\text{TDS}]_0} \right) \times 100 \quad (9)$$

$[\text{X}]_0$: concentration à l'instant initial.

$[X]_t$: concentration à l'instant t.

$X = F^-, SO_4^{2-}, Cl^-, \dots$

Les expériences d'électrodialyse ont été effectuées en utilisant des concentrations initiales en fluor de 1,8 ; 2,5 ; 3,5 et 4,5 ppm. Les résultats montrent que le meilleur taux de rétention du fluor et un faible rejet de sulfate ont été obtenus avec la membrane anionique ACS [151].

Les expériences ont montré que la concentration en fluorure diminue linéairement avec le taux de rétention global pour les quatre concentrations initiales en fluor étudiées jusqu'à la valeur de 35 % et au-delà de cette valeur du TRG, la concentration en fluorure reste constante. Les résultats ont par ailleurs montré qu'en opérant à 40 % du TRG, une bonne qualité de l'eau de boisson satisfaisant aux niveaux admissibles en TDS, nitrates et fluorure est obtenue [151].

➤ **Avantages :**

L'électrodialyse donne de bons résultats pour l'élimination des sels des eaux saumâtres.

➤ **Inconvénients :**

Les problèmes de polarisation et de coût, dû à la consommation d'une grande quantité d'énergie, sont des facteurs qui limitent l'efficacité de l'élimination des eaux très fortement riches en ions fluorures.

Un manque de sélectivité des membranes vis-à-vis des ions fluorures est facteur limitant l'électrodialyse comme une méthode de défluoruration.

Une analyse du coût montre que le mètre cube d'eau traitée revient approximativement à 107 FCFA [6].

➤ **L'osmose inverse (OI) :**

L'osmose, phénomène naturel mis en évidence pour la première fois par l'Abbé Nollet en 1748, n'a connue des applications pratiques par l'osmose inverse que dans la seconde moitié du XX^e siècle [141]. En effet, si d'un côté d'une membrane d'osmose (semi-perméable), on a une solution concentrée et de l'autre une eau pure ou une solution diluée, la pression osmotique de l'eau pure permet à celle-ci de traverser seule la membrane et d'aller diluer la solution concentrée, rééquilibrant ainsi la différence de potentiel chimique due à la différence de concentration : c'est le principe de l'osmose [3].

Si on applique du côté du compartiment le plus concentré une pression hydrostatique égale à la pression osmotique, on empêche le phénomène d'osmose de se produire. Par contre, en appliquant une pression supérieure à celle osmotique, on inverse le phénomène d'osmose car on fait passer l'eau pure du milieu concentré vers le milieu dilué : on peut ainsi débarrasser la

solution de ses sels, c'est l'osmose inverse [141]. Une illustration schématique de l'osmose directe et de l'osmose inverse est donnée par les figures 3a et 3b ci-dessous :

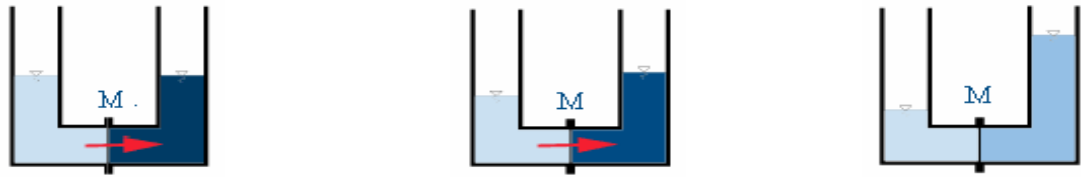


Figure 3a : principe de l'osmose.

M : membrane semi-perméable.

Migration spontanée de la solution diluée vers la solution concentrée.

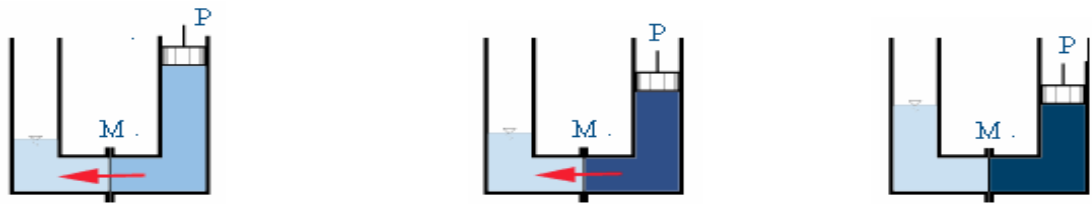


Figure 3b : principe de l'osmose inverse.

M : membrane semi-perméable.

P : force de pression.

L'application d'une force de pression entraîne la migration de la solution concentrée vers celle diluée.]

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation-diffusion : toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration ou de pression. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire.

L'écoulement à travers la membrane s'effectue de manière tangentielle. En effet, une partie de la solution à traiter de débit Q_0 se divise au niveau de la membrane en deux parties différentes. Une partie qui traverse la membrane, avec un débit Q_p , appelée perméat et une autre partie qui contient les molécules et particules retenues par la membrane, appelée concentrât ou retentât. La fraction de débit qui traverse la membrane, appelée taux de conversion Y , est définie par la relation suivante :

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0} \quad (10)$$

Des opérations de prétraitement et de post-traitement sont nécessaires. Les prétraitements sont indispensables avant l'expérience d'osmose inverse, la fiabilité de l'installation et la durée de vie des membranes en dépendent, car ils représentent souvent la partie la plus importante du coût du traitement global (jusqu'à 60 %). En effet, ils protègent les membranes du colmatage et assurent une décontamination bactérienne de la solution à épurer. Il est aussi nécessaire de procéder à un adoucissement pour éviter l'entartage. Le post-traitement consiste en général en une reminéralisation qui est indispensable pour avoir une eau de boisson et à un ajout de désinfectant pour obtenir un effet microbicide rémanent. Si l'objectif visé est l'élimination de l'ion fluorure en même temps que la minéralisation excessive de l'eau, l'osmose inverse peut constituer une solution spécifique. L'élimination du fluor par osmose inverse est fonction du pH : le pourcentage d'élimination augmente d'environ 45 à 90 % lorsque le pH passe de 5,5 à 7 [144].

La défluoruration a été étudiée expérimentalement par la technique d'osmose inverse avec l'utilisation d'une membrane ESPA3. C'est une membrane composite d'osmose inverse à basse pression. L'expérience a été menée sur une eau de boisson de la région de Kaolack (Sénégal) dont la concentration en fluorure est de 2,6 ppm. La pression transmembranaire mise en œuvre pendant l'expérience est de 5,3 bars avec une vitesse d'écoulement de 0,22 m/s. Les résultats obtenus montrent que la quasi-totalité des sels minéraux est retenue par la membrane, aussi pour le fluor, un abattement voisin de 100 % a été noté. En effet, la concentration en fluor de l'eau obtenue était de 0,04 ppm. Ainsi, il était nécessaire de procéder à une reminéralisation de l'eau obtenue après traitement pour la rendre potable [152].

➤ Avantages:

L'osmose inverse permet d'enlever pratiquement tout le fluor ainsi que la salinité. C'est une technique très efficace pour le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres ainsi que pour la production d'une eau ultra pure. Le fait de ne pas utiliser des réactifs chimiques comme agents d'extraction qui sont souvent des sources de pollution est un avantage considérable.

➤ Inconvénients:

Les opérations de prétraitements et de post-traitements constituent un obstacle à l'osmose inverse car elles augmentent le coût de l'opération. En plus l'osmose inverse fait intervenir des quantités importantes d'énergie. Des pressions de travail supérieures à 30 bars entraînent des coûts importants du traitement.

Les membranes d'osmose inverse sont non-sélectives et présentent des taux de rétention supérieurs à 95 % pour tous les sels, ce qui nécessite une étape incontournable de reminéralisation pour rendre l'eau potable.

La consommation d'énergie en osmose inverse est de l'ordre de 2 à 10 KWh/m³. La méthode fournit une production de 10 à 60 l/h/m² [6].

L'estimation du coût du traitement s'est chiffrée à environ 300 FCFA le mètre cube [6].

➤ **La nanofiltration (NF) :**

La nanofiltration est une technique de séparation utilisant une membrane qui permet le fractionnement des solutés dont la masse molaire est comprise entre 100 et 1000 Da (g/mol) [20]. Avec l'apparition sur le marché de nouvelles membranes sélectives pour les sels minéraux, les eaux faiblement minéralisées peuvent être traitées à des pressions très basses (< 20 bars). Ces nouvelles membranes permettent d'obtenir à des coûts énergétiques plus faibles, une eau de qualité. La pression de fonctionnement est faible comme en ultrafiltration [6]. Un pilote de nanofiltration est montré en ANNEXE 5.

L'histoire de la nanofiltration date des années 1970, lorsque des membranes d'osmose inverse fonctionnant à des flux d'eaux raisonnables et à des pressions relativement basses ont été développées. C'est pour cette raison que la nanofiltration est parfois appelée osmose inverse à basse pression. A la fin des années 1980, l'intérêt de la nanofiltration a été établi et les premières applications ont été rapportées. Aujourd'hui, 10 % du marché des eaux saumâtres dans le monde est consacré aux membranes de nanofiltration [51].

Des expériences de nanofiltration ont été menées sur des membranes NF90 et NF400 afin de déterminer leur sélectivité vis-à-vis des ions fluorures et des sels.

Les résultats expérimentaux montrent que les ions fluorures sont pratiquement retenus par la membrane NF90 indépendamment de la concentration initiale en fluor. Par contre, pour la membrane NF400, la concentration de fluor dans le perméat augmente avec celle contenue dans l'eau brute. Pour cette membrane, une concentration en fluor de l'eau traitée respectant les normes était obtenue uniquement avec la concentration initiale de 1,8 ppm parmi les quatre gammes de concentration qui étaient choisies pour l'étude (1,8 ; 5 ; 10 ; 20). Ce qui nécessite donc un deuxième passage à travers la membrane pour les concentrations supérieures à 1,8 ppm pour pouvoir obtenir une eau respectant les normes de potabilité.

La rétention des sulfates est totale pour les deux membranes alors que des rétentions de 87 % notées avec la membrane NF90 et de 40 % avec la membrane NF400 pour les nitrates ont permis de réduire leurs concentrations à des valeurs satisfaisantes.

La membrane NF400 produit une eau de meilleure qualité que la membrane NF90 car avec cette dernière, le TDS de l'eau traitée est très faible et que pratiquement toutes les valeurs des

paramètres sont largement inférieures à celles des normes standard, ce qui nécessite obligatoirement une reminéralisation de l'eau traitée pour qu'elle devienne potable [153].

L'utilisation d'une installation pilote de nanofiltration dans cette étude a montré l'aptitude de cette technique à réduire l'excès de fluor contenu dans les eaux souterraines.

Des expériences menées sur des eaux reconstituées ont montré que la rétention du fluor était fortement influencée par la présence d'autres anions tels que Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ...

Trois membranes (NF70, DESAL 5 DL et MT 08) ont été soumises à des études à cet effet. Les trois membranes ont donné un niveau élevé de rétention du fluor pour la solution contenant le sel de fluor seul. Les membranes DESAL 5 DL et MT 08 montrent un taux de rétention beaucoup plus élevé dans le cas des ions fluorures (respectivement 83 % et 90 %) que dans le cas des ions chlorures (respectivement 69 % et 85 %). L'étude de l'élimination du fluor dans le mélange NaF-NaCl montre que la présence des ions chlorures entraîne une légère baisse du niveau de rétention des ions fluorures par la membrane NF70 (de 90 à 88 %) et la DESAL 5DL (de 83 à 78 %). De même, l'étude du mélange NaF- Na_2SO_4 par les membranes de nanofiltration montre qu'une augmentation de la concentration en sulfate de 50 à 200 mg/L induit une réduction de la concentration de fluor retenue par les membranes NF70 et DESAL 5 DL [154].

L'étude a montré que la rétention du fluor est très fortement influencée par la présence d'autres anions, particulièrement par les anions divalents. Le mélange de NaF, NaCl et Na_2SO_4 donne une augmentation de la rétention des ions fluorures lorsque la concentration de Na_2SO_4 est ramenée de 50 à 200 mg/L. Cette augmentation de la rétention des ions fluorures n'est pas observée lorsqu'on augmente la concentration de Na_2SO_4 de 50 à 200 mg/L en l'absence de NaCl dans le mélange. En effet, la rétention du fluor dépend de la composition en sels de la solution à filtrer : c'est donc la composition ionique de la solution qui est le facteur majeur de la rétention des ions fluorures [154].

Les résultats d'une étude portant sur le traitement par NF d'une eau de forage à Niakhar (Thiès, Sénégal) montrent qu'une différence de rétention de 13 % entre les ions fluorures et les ions chlorures permet d'abaisser suffisamment les ions fluorures au seuil souhaité en même temps qu'une déminéralisation partielle [6]. Aussi, les résultats d'un traitement comparatif entre l'osmose inverse et la nanofiltration d'une eau de puits prise à Palmarin (région de Sine-Saloum, Sénégal) montrent une déminéralisation plus poussée en osmose inverse, nécessitant une reminéralisation.

➤ Avantages:

La sélectivité des membranes de nanofiltration pour les sels et les ions constitue un avantage majeur pour cette technique. Des taux de rétention allant de 20 à 95 % sont obtenus. On peut aussi noter les basses pressions (< 20 bars) d'opération mises en œuvre, une production de 50 à 100 L/h/m² et une consommation d'énergie de 1 à 2 KW/m³ [6].

Certaines membranes convenables permettent d'obtenir une eau de qualité sans traitement supplémentaire. Les pressions d'opérations sont faibles comparées à celles mises en œuvre en osmose inverse pour les mêmes valeurs du fluor résiduel. Par conséquent le coût du traitement est plus abordable en nanofiltration qu'en osmose inverse.

Un flux élevé avec une grande rétention des anions multivalents et des composés organiques de poids moléculaire voisins de 300 Da est noté.

L'investissement est relativement faible avec des coûts d'opération et de maintenance accessibles. En définitive, la nanofiltration permet de réaliser en une seule étape la défluoruration et la stérilisation totale des eaux saumâtres hyper-fluorurées du bassin du Sénégal, aucune reminéralisation n'est nécessaire après le traitement.

➤ Inconvénient:

Certaines membranes de nanofiltration très denses nécessitent une étape de reminéralisation.

Le mètre cube d'eau traitée est estimé à environ 48 FCFA [6].



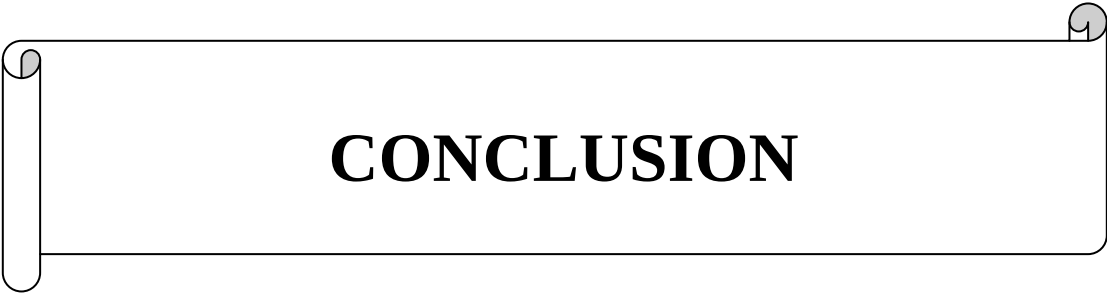
CHOIX DU PROCEDE

V - CHOIX DU PROCEDE

L'étude des principales techniques pour le traitement des eaux riches en fluor nous a permis de constater que la méthode de précipitation peut donner de bons résultats, avec des concentrations finales en fluor inférieures à 1 mg/L pour des eaux faiblement fluorées [142]. Cependant, cette technique est difficile à mettre en œuvre car nécessitant plusieurs étapes telles que la coagulation-floculation, la décantation, mais aussi elle demande des investissements importants et coûteux. En plus, cette méthode nécessite de grandes quantités de réactifs, augmentant ainsi les charges et les coûts du traitement [21,142]. Les méthodes d'adsorption constituent, elles aussi, un moyen très utilisé pour l'élimination de l'excès de fluor dans l'eau de boisson. Ces techniques sont faciles à mettre en œuvre et donnent de bons résultats sur la rétention du fluor. Elles sont effectuées sur des matériaux disponibles localement à des prix abordables. Ces matériaux peuvent être facilement régénérés avec de l'acide ou de la base une fois qu'ils sont saturés [146]. L'inconvénient majeur de ces techniques est la nécessité de grandes quantités de réactifs adsorbants mais aussi l'efficacité qui n'est réelle que pour les eaux peu chargées en fluor [21,146]. Cette méthode peut constituer une solution à l'élimination de l'excès de fluor dans l'eau de boisson à l'échelle domestique pour le Sénégal grâce à la simplicité de sa mise en œuvre et les résultats acceptables qu'elle fournit. Les résines échangeuses d'ions sont peu utilisées pour l'élimination de l'excès de fluor à cause du coût relativement élevé, mais aussi du fait qu'il n'existe pas de résines spécifiques aux ions fluorures [6]. Nous avons pu constater que l'électrodialyse a été utilisée non seulement pour réduire l'excès de fluor, mais aussi et surtout pour régler le problème de la salinité de l'eau de boisson [152]. C'est une technique qui devrait bien s'adapter au cas du Sénégal où l'eau de certaines régions, en plus de l'excès de fluor, présente un caractère saumâtre ; toutefois, les coûts du traitement dus à la consommation de grandes quantités d'énergie limitent son applicabilité pour le Sénégal. L'osmose inverse est une technique qui permet d'éliminer la quasi-totalité des ions fluorures ainsi que les autres sels, ce qui fait que l'eau traitée doit faire l'objet d'une reminéralisation pour la rendre potable [153]. Cela augmente le coût du traitement, en plus d'importantes quantités d'énergie utilisées et les opérations de prétraitements obligatoires pour éviter le colmatage des membranes. Cette technique est souvent utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, elle n'est pas appropriée pour la défluoruration des eaux de boisson saumâtres du Sénégal. En ce qui concerne la nanofiltration, l'existence de membranes sélectives donne des taux de rétention variant de 20 à 95 %. Cette technique membranaire nécessite de basses pressions opératoires et une faible quantité d'énergie comparativement à l'osmose inverse pour l'obtention pratiquement de mêmes résultats [6].

La nanofiltration, qui peut être utilisée à l'échelle communautaire, permet d'avoir une eau de bonne qualité sans traitement supplémentaire ce qui améliore le coût du traitement par rapport à l'osmose inverse [6]. L'utilisation de membranes sélectives de nanofiltration devrait donc permettre de résoudre aussi bien le problème de l'excès de fluor que de la salinité des eaux des régions du bassin arachidier du Sénégal et fournir aux populations locales une eau de boisson de qualité.

Ainsi, il apparaît clairement que pour les méthodes classiques de défluoruration, l'adsorption dans des colonnes donne des résultats acceptables qui peuvent résoudre le problème de l'excès de fluor dans l'eau de boisson tant du point de vue de sa facilité de mise en œuvre que de l'efficacité des résultats qu'elle fournit pour la production de petites quantités d'eau. Aussi, pour les techniques membranaires, la nanofiltration se révèle comme la méthode la mieux adaptée pour le cas du Sénégal en ce sens qu'elle permet d'obtenir un abattement suffisant des ions fluorures tout en éliminant le problème de la salinité qui est une spécificité Sénégalaise. La nanofiltration permet d'obtenir une eau potable de qualité à un coût abordable.



CONCLUSION

CONCLUSION

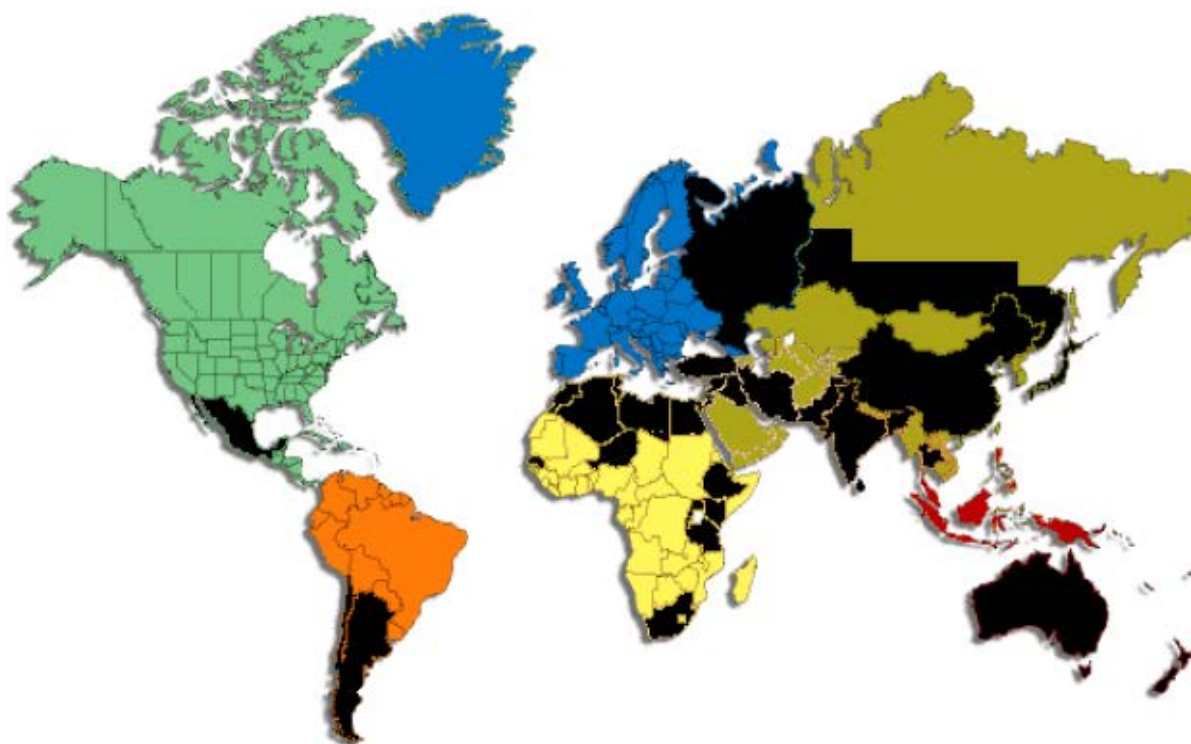
La contamination des eaux souterraines par le fluor est un problème qui touche beaucoup de pays du monde. La consommation de telles eaux entraîne des conséquences graves de santé publique au niveau des populations exposées. Les affections notées vont de la fluorose dentaire, qui est un problème esthétique, à des effets sur l'intelligence des enfants en passant par la fluorose osseuse entre autres. Pour respecter les recommandations de l'OMS et les normes en vigueur des pays, le traitement de l'eau s'est révélé comme seul moyen pour réduire ou éliminer l'excès de fluor dans l'eau de consommation. Diverses méthodes ont été expérimentées et mises en œuvre dans de nombreux pays du monde en fonction de la disponibilité de matériaux locaux tels que le charbon d'os, l'argile, l'alumine activée... etc. Ces techniques dites classiques sont convenables à l'échelle domestique car étant faciles à mettre en œuvre mais aussi donnant de bons résultats. A côté de ces méthodes dites classiques se sont développées d'autres plus récentes appelées techniques membranaires. Elles sont continues et donnent des résultats satisfaisants en une seule étape sans ajout de réactifs chimiques. Cependant, elles demandent de gros investissements avec une grande consommation d'énergie. Pour le cas spécifique du Sénégal où nous avons un excès de fluor concomitant à une forte salinité de l'eau de boisson, la nanofiltration peut constituer une solution au problème. En effet, la nanofiltration permet d'avoir un abattement suffisant en ions fluorures tout en réduisant simultanément la salinité. Elle permet, en outre, de fournir une eau de boisson de qualité respectant les recommandations de l'OMS et les normes Sénégalaises en matière d'eau potable. Avec la disponibilité dans nos pays de ressources énergétiques telles que l'éolienne et le solaire, le couplage de ces dernières avec la nanofiltration devrait permettre de réduire davantage le coût du traitement.

Nous envisageons dans le cadre des recherches futures de mettre en œuvre la défluoruration par adsorption dans des colonnes et par nanofiltration afin de pouvoir optimiser avec des eaux réelles sur site, les résultats de ces techniques quant à l'élimination de l'excès de fluor et de la salinité des eaux de boisson fluorurées du bassin arachidier du Sénégal.



ANNEXES

ANNEXE 1

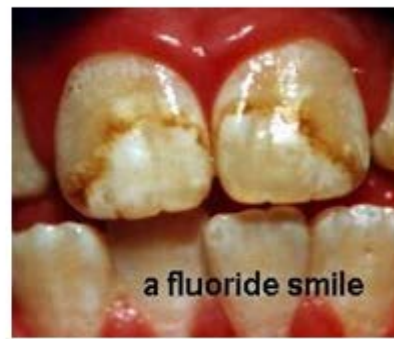


Légendes

- | | |
|--|--|
|  Région I, Afrique |  Régions IV, Amérique du Nord et Centrale |
|  Région II, Asie |  Région V, Pacifique Sud-Ouest |
|  Région III, Amérique du Sud |  Région VI, Europe |
|  Pays où une partie de la population est affectée de façon endémique par la fluorose en relation avec des eaux souterraines riches en fluor (>1.5mg/l, norme OMS) | |

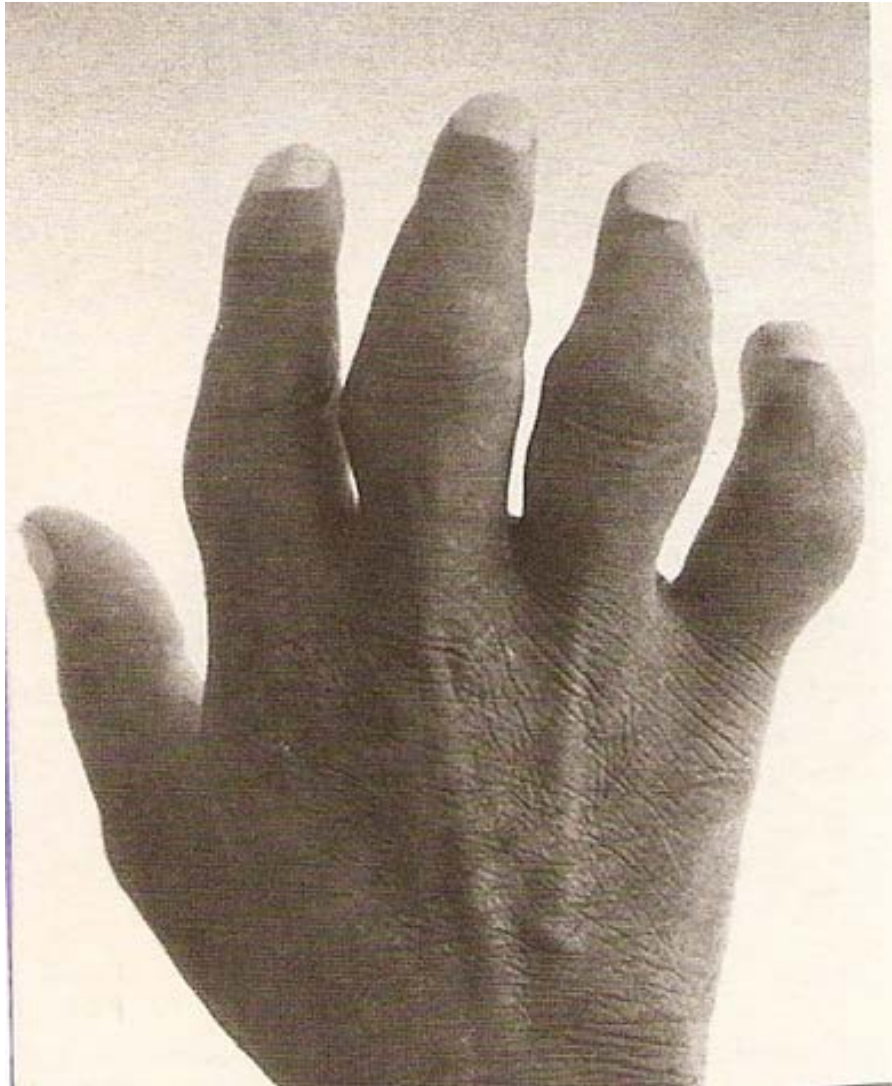
Cartographie mondiale des pays concernés par l'excès de fluor dans l'eau de boisson selon Mazet [3].

ANNEXE 2



Cas de fluorose dentaire [155].

ANNEXE 3A



Cas de fluorose osseuse de la main au Sénégal [82].

ANNEXE 3B



Enfants victimes de fluorose osseuse en Inde [156].

ANNEXE 3C



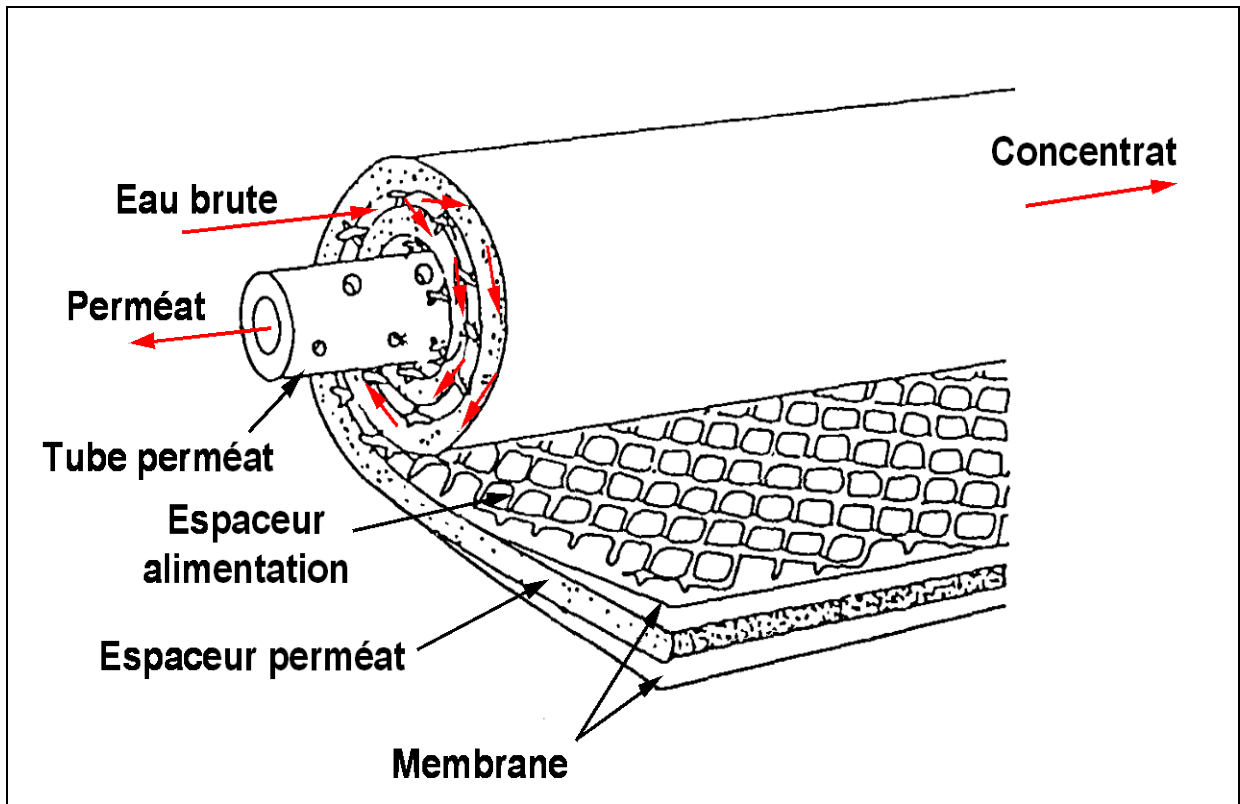
Cas de fluorose osseuse en Inde [156].

ANNEXE 3D



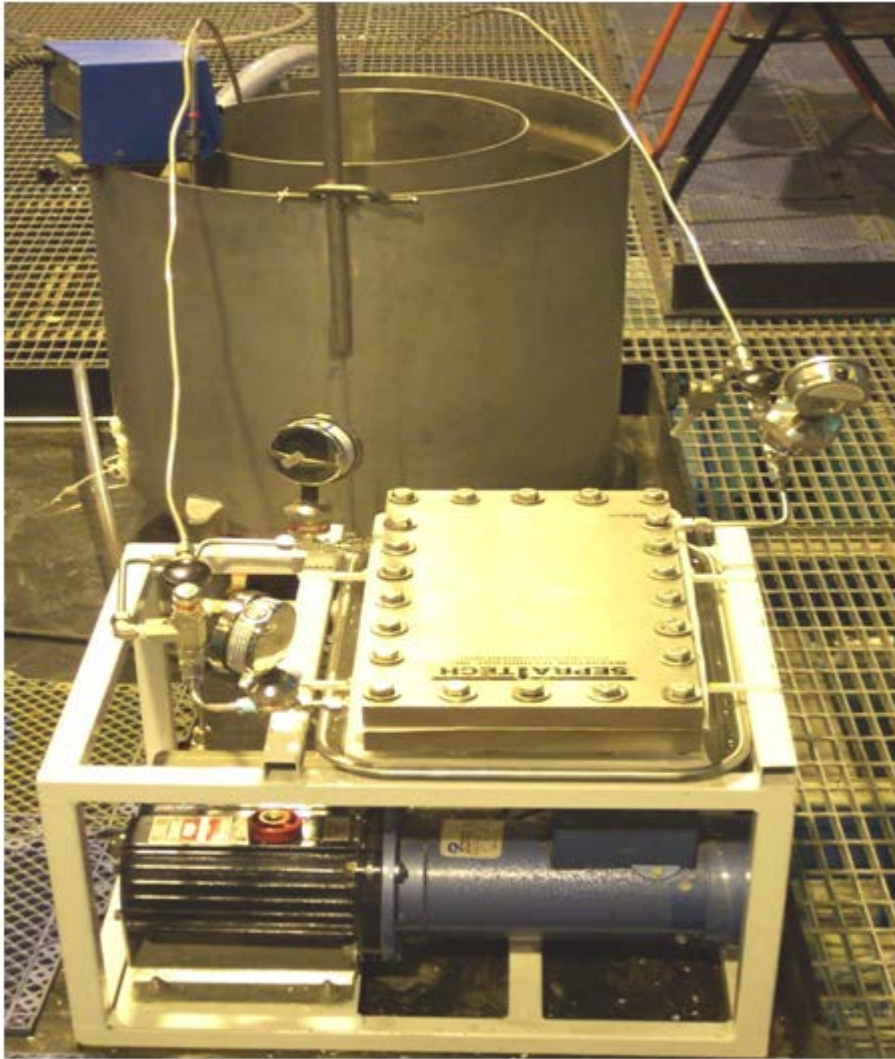
Filles Tanzaniennes victimes de fluorose osseuse [4].

ANNEXE 4



Module spiralé de membrane à enroulement simple [157].

ANNEXE 5



Pilote de nanofiltration [157].

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

<u>Tableau 1</u> : propriétés physico-chimiques du fluor.....	19
<u>Tableau 2</u> : répartition des personnes en fonction de la concentration de l'eau de boisson en fluorure selon Y. Li et coll.	40
<u>Tableau 3</u> : pourcentage des personnes atteintes de fracture d'os en fonction de la concentration de l'eau de boisson en fluorure selon Y. Li et coll.....	40
<u>Tableau 4</u> : correspondance entre les valeurs de Q.I. et l'attribution du niveau intellectuel selon Y. Lu et coll.....	45
<u>Tableau 5</u> : niveaux de fluor et Q.I. des enfants habitant dans les régions à forte et faible concentration de fluor dans l'eau de boisson selon Y. Lu et coll.....	45
<u>Tableau 6</u> : distribution des notes de Q. I. pour les enfants habitant dans les régions à forte et faible concentration de fluor dans l'eau de boisson selon Y. Lu et coll.....	46
<u>Tableau 7</u> : adsorbants utilisés pour l'étude préliminaire de défluoruration selon Choi et Chen.....	57
<u>Tableau 8</u> : capacité d'élimination du fluor avec l'augmentation à la fois de la concentration initiale de fluor et du pH de l'eau selon Kailash et coll.....	63
<u>Tableau 9</u> : prix du litre d'eau traitée selon les techniques KRASS, AA et NA selon Kailash et coll.....	64
<u>Figure 1</u> : colonnes avec différentes couches de matériau.....	61
<u>Figure 2</u> : schéma illustratif de fonctionnement de l'électrodialyse.....	66
<u>Figure 3a</u> : principe de l'osmose.....	69
<u>Figure 3b</u> : principe de l'osmose inverse.....	69



REFERENCES

REFERENCES

- [1] ISACAT traitement des eaux (Source Internet), réalisation : Dominique Buzaré dbuzare@afigfoessel.fr. Révision 25 Août 1999
<http://www.afigfoessel.fr/faq.html>, http://www.eaux.free.fr/traitements-eaux_eau.htm ; consulté le 08/05/2006.
- [2] Gros plan sur l'eau et la santé. World Water Day 2001. 2001-2003, 2002 OMS, implémenté par IRC (Source Internet) : <http://www.worldwaterday.org> ; consulté le 30/08/2006.
- [3] Mazet P. Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde. Université des Sciences et Technologies Montpellier II, IRD. 45 p.
- [4] Mjengera H., Mkongo G. Appropriate defluoridation technology for use in fluorotic areas in Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth 2003; 28: 1097-1104.
- [5] Mc Caffrey L. P. et Willis J. P. Distribution of fluoride-rich groundwater in the Eastern and Mogwase Regions of the Northern and North-West Provinces. WRC Report N° 526/1/01 cité par Coetzee P. P., Coetzee L. L., Puka R. et Mubenga S. dans: characterisation of selected South African clays for removal defluoridation of natural waters. Water SA 2003 ; 3 (29): 331.
- [6] Pontié M., Rumeau M., Ndiaye M., DIOP C. M. 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.
- [7] Danger du Fluor (Source Internet) :
<http://www.aci-multimedia.net/feminin/sante/fluor1.html>
<http://www.amessi.asso.fr/dangerdufluor> ; consulté le 22/09/2006
- [8] Lu Y., Sun Z. R., Wu L. N., Wang X., Lu W., Liu S. S. Effect of high fluoride water on intelligence in children. Fluoride 2000; 2 (33): 74-78. Research Report.
- [9] Rodier J. "l'analyse de l'eau". 8^e édition Dunod : 981-984.
- [10] Cotton F. A. et Wilkinson G. Advanced inorganic chemistry. John Wiley et sons, New York NY 1988: 546.
- [11] Mackay K. M. et Mackay R. A. Introduction to modern inorganic chemistry. 4^e edition Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1989: 339.
- [12] Propriétés et caractéristiques du fluor (source Internet)
<http://www.encyclopedie.izynews.be/fr/lexw.aspx?doc=Fluor>, consulté le 17/09/2006.
- [13] Histoire du fluor (source Internet):
http://www.presselibreinternationale.com/fluor/histoire_101.html
<http://www.presselibreinternationale.com/fluor/fluor.html> ; consulté le 14/10/2006.

- [14] Yiamouyiannis J., "Fluoride - The Aging Factor". 3rd. Edition. Health Action Press, 6439 Taggart Road, Delaware, Ohio 1993, cité par la référence 13.
- [15] Le fluorure. Groupe scientifique sur l'eau, fiche sur l'eau. Institut National de Santé Publique du Québec. Août 1996 (Révisé en février 1997).
- [16] Blard S. Les techniques de traitement des eaux chargées en Arsenic, Fluor et Plomb. Synthèse technique. Montpellier. ENGREF 2005, 21p.
- [17] Wedepohl K H. "hand-book of geochemistry." Springer-Verlage, Berlin, Heidelberg, New York, 1974; 4 (2): p9K-1, cité par la référence 3.
- [18] Koritnig S. "Zur Geochemie Des Fluors Den Sedimenten" Fortchr. Geol. Rheinld. Westf. 1963; 10: 231.
- [19] Gaciri S. J., Davies T. C. "the occurrence and geochemistry of fluoride in some natural waters in Kenya." Hydrological Sciences Journal 1993; 143: 395-412, cité par la référence 3.
- [20] Chernet T., Travi Y., Valles V. "Mechanism of degradation of the quality of natural water in the lakes Region of the Ethiopian rift valley." Water Res. 12 (35): 2819-2832, cité par la référence 3.
- [21] Pontié M., Schrotter J. C., Lhassani A. et Diawara C. K. Traitement des eaux destinées à la consommation humaine. Elimination domestique et industrielle du fluor en excès. Fluor et Environnement. L'actualité chimique - Octobre-Novembre 2006 – n° 301-302 : 2-7.
- [22] Smyshlyaev S. I., Edeleva N. P. "Determination of the solubility of minerals. Solubility product of the fluorite." Izv. Vysshikh Uchebn. Zavadenii Khim Tekhnologiya 1992; vol. 5, cité par la référence 3.
- [23] Travi Y. "Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères du Sénégal. Sciences Géologiques. Mémoire n° 95 (1993) ; ISSN 0302-2684 ; 155 p, cité par la référence 3.
- [24] Burkhalter R. A., Mix T. J., McCall M. F., Provost D. O. "Assessing Cyanide contamination from an aluminium Smelter." Environmental Sampling for Hazardous Wastes. American Chemical Society, Washington 1984 : 15-26, cité par la référence 3.
- [25] Ripa L.W. Fluorures. Chap. 6 dans : La dentisterie préventive. 2^e édition. Ministère de la santé nationale et du bien-être social, Ottawa (1998).
- [26] Source Mme NIANF F. B., sous-directeur du traitement des eaux à la SDE.
- [27] U. S. Environmental Protection Agency. Drinking water criteria. Document on fluoride. Contrat n° 68-03-3279, office on drinking water, Cincinnati, OH (1985), cité par la référence 15.
- [28] Spencer H., Kramer L., Norris C. et Wiatrowski E. Effect of aluminium hydroxide on fluoride metabolism. Clin. Pharmacol. Ther. 1980; 28: 529-535, cité par la référence 15.
- [29] Organisation Mondiale de la Santé. Fluorine and Fluorides. Environment Health Criteria 36, International Programm on Chemical Safety ; Genève (1984), cité par la référence 15.

- [30] McIvor M. E. Acute fluoride toxicity: pathophysiology and management. *Drug Saf.* 1990; 5: 79-85, cité par la référence 15.
- [31] Fluorures et santé Bucco-dentaire, série de rapports techniques 846. Organisation Mondiale de la Santé, Genève, 1994.
- [32] Hodge H. C. et Smith F. A. Biological properties of inorganic fluorides. Dans: *fluorine chemistry*. Simons J. H. (dir. De publ.). Academic press, New York, NY 1965 : 1-43, cité par la référence 15.
- [33] DIA M. N. M. Etude d'un foyer de fluorose dentaire et osseuse au Sénégal: village de Ndangarlame (région de Fatick); thèse de Doctorat en Médecine n° 4 (1993) 118p; Université Cheikh Anta DIOP de DAKAR. Faculté de Médecine et de Pharmacie.
- [34] Caraccio T. P., Greensher J. et Mofenson H. C. The toxicology of fluoride. Dans: *clinical management of poisoning and drug overdose*. Haddad L et Winchester J. (dir. De publ.) W B Saunders Co, Philadelphia, PA (1983), cité par la référence 15.
- [35] Whitford G. M. The physiological and toxicological characteristics of fluoride. *J. Dent. Res* 1990; 69: 539-549, cité par la référence 15.
- [36] Burt B. A. The changing patterns of systemic fluoride intake. *J. Dent. Res.* 1992; numéro special (71): 1228-1237, cité par la référence 15.
- [37] Caldera R., Chavinie J., Laurent A. M., Fermanian J., Tortrat D. Fluor et grossesse. *Actualité Odonto-Stomatologiques* 1987 ; 158: 277-288.
- [38] Caldera R., Laurent A. M. Fluor dans le liquide amniotique. *Prés. Méd.* 1987; (16): 826.
- [39] Van Rensburg B. G. Metabolism of fluorides. *Tydskr. Tandheelkd. Ver. S. Afr.* 1979; 34: 163-166 , cité par la référence 15.
- [40] Ekstrand J., Hardell L. L. et coll. Fluoride balance studies on infants in a 1 ppm-water-fluoride area. *Caries Res.* 1984; 4 (18): 87-92, cité par la référence 15.
- [41] Ekstrand J., Spak C. J. et coll. Distribution of fluoride to human breast milk following intake of high doses of fluoride. *Caries Res.* 1984; 1 (18): 93-95, cité par la référence 15.
- [42] Ekstrand J., Alvan G., Boreus L. O. et Norlin A. Pharmacokinetics of fluoride in man after single and multiple oral doses. *Eur. J. Clin. Pharmacol.* 1977; 12: 311-317, cité par la référence 15.
- [43] Spencer H., Osis D. et Lender M. Studies of fluoride Metabolism in man: a review and report of original data. *Sci. Total Environ.* 1981; 17: 1-12, cité par la référence 15.
- [44] Spencer H., Lewin I., Wistrowski E. et Samachson J. Fluoride Metabolism in man. *Am. J. Med.* 1970; 49: 807-813, cité par la référence 15.

- [45] Hodge H. C. et Smith F. A. Minerals: fluorine and dental caries. Dans: Dietary chemical vs. dental caries. Advances in chemistry Series n° 94, American Chemical Society, Washington, DC (1970), cité par la référence 15.
- [46] Cutress T. W. et Suckling G. W. Differential diagnosis of dental fluorosis J. Dent. Res. 1992; numéro special (69): 714-721, cité par la référence 15.
- [47] Fluoride Health Effects Database. Fluoride Action Network, Researched and maintained by Michael Connet, FA updated, August 29, 2005.
- [48] Fejerskov O., Manji F. et Baelum V. The nature and mechanisms of dental fluorosis in man. J. Dent. Res. 1990; numéro special (69): 692-700, cité par la référence 15.
- [49] Smith G. E. Fluoride and fluoridation. Soc. Sci. Méd. 1998; 26 (4): 451-462, cité par la référence 15.
- [50] Evans R. W. et Stamm J. W. An epidemiologic estimate of the critical period during which maxillary central incisors are most susceptible to fluorosis.. J. Public Health Dent. 1991; 4 (51): 251-259, cité par la référence 15.
- [51] Pontié M., Diawara C. K., Lhassani A., Dach H., Rumeau M., Buisson H. et Schrotter J. C. Water Defluoridation Processes A Review. Appllication: Nanofiltration (NF) for Future Large-Scale Pilot Plants. Fluorine and the Environment 2006; (2): chap 2: 50-80.
- [52] Ad Hoc Subcommittee on fluoride of the committee to coordinate environmental health and related programs. Review of fluoride benefits and risks. Public health Service, U. S. Departement of health and human services, Research Triangle Park, NC, Février 1991, cité par la référence 15.
- [53] Bailleul-Forestier I., Naulin C. Prophylaxie de la carie dentaire. Revue du Praticien 1997; 11 (371): 15-15.
- [54] Clark D. C. Trends in prevalence of dental fluorosis in North America. Commun. Dent. Oral Epidemiol. 1994; 3 (22): 148-152, cité par la référence 15.
- [55] Limeback H. Enamel formation and the effects of fluoride. Commun. Dent. Oral Epidemiol. 1994; 3 (22): 144-147, cité par la référence 15.
- [56] Evans R. W. et Stamm J. W. An epidemiologic estimate of the critical period during which maxillary central incisors are most susceptible to fluorosis.. J. Public Health Dent. 199; 4 (51): 251-259, cité par la référence 15.
- [57] Advisory Review Panel. Recommandations regarding fluoride intake. Investigation of inorganic fluoride and its effects on the occurrence of dental caries and dental fluorosis in Canada. Rapport préparé pour le ministère de la santé nationale et du bien-être social, contrat de recherche n° 3726 (1993), cité par la référence 15.
- [58] Dean H. T., Arnold Jr F. A. et Elvove E. Domestic water supplies and dental caries V. Additional studies of the relation of fluoride domestic waters to caries experience of 4425 White

children, aged 12-14 years, of 13 cities and 4 states. Public Health Rep. 1942; 57: 1155-1179, cité par la référence 15.

[59] Dean H. T., Jay P., Arnold, Jr F. A. et Elvove E. Domestic water and dental caries II. A study of 2832 white children aged 12-14 years of 8 suburban Chicago communities. Including Lactobacillus acidophilus studies of 176 children. Public Health Rep. 194; 56: 761-792, cité par la référence 15.

[60] Clark D. C. Working group report on the ingestion of inorganic fluoride and its effect on the occurrence of dental caries and dental fluorosis in Canada. Dans: Investigation of inorganic fluoride and its effects on the occurrence of dental caries and dental fluorosis in Canada. Rapport préparé pour le ministère de la santé nationale et du bien-être social, contrat de recherche n° 3726 (1993), cité par la référence 15.

[61] Ismail A. I. Dental caries, fluorosis and fluorides. Dans: Investigation of inorganic fluoride and its effects on the occurrence of dental caries and dental fluorosis in Canada. Rapport préparé pour le ministère de la santé nationale et du bien-être social, contrat de recherche n° 3726 (1993), cité par la référence 15.

[62] Eklund S. A. et Striffer D. F. Anticaries effect of various concentrations of fluoride in drinking water: evaluation of empirical evidence. Public Health Rep. 1980; 95: 486-490, cité par la référence 15.

[63] Raoult A., Toury J., Perrelon J. et coll. Premières études sur un foyer de fluorose humaine au Sénégal. Bull. Med. AOF 1957; 2 (4): 359-371, cité par la référence 33.

[64] Brouwer I., De Bruin A. Ingestion élevée de fluor et risque pour la santé humaine. Rapport de mission au Sénégal, 2^e partie Avril 1986, cité par la référence 33.

[65] Brouwer I., De Bruin A., Dirks B. et coll., Unsuitability of world health organisation guidelines for fluoride concentrations in drinking water in Senegal
The Lancet 1988: 223-225, cité par la référence 33.

[66] Dia M. Etude des fluoroses dentaires et osseuses dans la région de Niakhar (Fatick) Sénégal. Thèse de Doctorat en médecine, Université de Dakar, 109p (1993).

[67] Du Plessis J. B. What would be the maximum concentration of fluoride in water that would not cause dental fluorosis ? Fluoride and fluorosis, The Status of S. Afr. Res., North West Province, 4, cité par la référence 51.

[68] Liens entre l'eau, l'assainissement, l'hygiène et la santé. Faits et chiffres-mises à jour de Novembre 2004. (Source Internet OMS) :
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/fr/index.html
Consulté le 14/10/2006

[69] Diaz-Barriga, Navarro-Quezada A., Grijalva M. I., Grimaldo M., Loyola-Rodriguez J. P., Ortiz M. D. "Endemic fluorosis in Mexico." Fluoride 1997; 30: 233-239, cité par la référence 3.

[70] Fluorose dentaire. (Source internet)

http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/fluorose_os.html

Consulté le 27/11/2006.

[71] Fluorose osseuse. (Source internet)

http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/fluorose_os.html

Consulté le 27/11/2006.

[72] Grynpas M. D. Fluoride effects on bone crystals. J. Bone Min. Res. 1990; 5: 169-175, cité par la référence 15.

[73] Gruber H. E. et Baylink D. J. The effects of fluoride on bone. Clin. Orthop. 1991; 267: 264-277, cité par la référence 15.

[74] Agence for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, fluorine (F). ATSDR/TP-91/17, Public Health Service, U. S. Departement of Health and Human Services, Atlanta, GA, Avril (1993), cité par la référence 15.

[75] Kaminsky L. S., Mahoney M. C., Leach J., Melius J. et Miller M. J. Fluoride: benefits and risks of exposure. Crit. Rev. Oral Biol. Med. 1990; 1: 261-281, cité par la référence 15.

[76] Grandjean P. et Thomsen G. Reversibility of skeletal fluorosis. Br. J. Ind. Med. 1983; 40: 456-461, cité par la référence 15.

[77] Sowers M., Wallace R. B. et Lemke J. H. The relationship of bone mass and fracture history to fluoride and calcium intake: a study of three communities. Am. J. Clin. Nutr. 1986; 44: 889-898, cité par la référence 15.

[78] Mukul P. A. Fluorosis in Maharashtra, J.A.P.I. 1991; 4 (39): 359-360, cité par la référence 33.

[79] Maloo J. C., Radhakrishnan K. et coll. Fluorotic radiculo-myelopathy in a Libyan male. Clin. Neurol. Neurosurg. 1990; 1 (92): 63-65, cité par la référence 33.

[80] Haimonot R. T., MD, FRCP(C). Neurological complications of endemic skeletal fluorosis with special emphasis on radiculo-myelopathy. Paraplegia 1990; (28): 244-251, cité par la référence 33.

[81] Naidu M. R. C., Reddy D. R., Reddy P. K., Kolluri V. R. S. Myelopathie cervicale fluorosique. Rev. Chirur. Orthop. 1989; 75: 228-231, cité par la référence 32.

[82] Sy M. H., Sene P., Diouf M. M. et Diouf S. Fluorose osseuse au niveau de la main. A propos de deux observations. Ann. Chir. Main (Ann Hand Surg) 1996; 2 (15) : 109-114.

[83] Le fluor qui tue au Niger. (Source Internet)

http://www.presselibreinternationale.com/fluor/HTML/fluor_qui_tue_niger.html

Consulté le 14/11/2006.

- [84] Fluorides Damages Children's Bones-study NYS coalition opposed to fluoridation. (Source Internet).
<http://www.rense.com/general65/bones.htm>
Consulté le 18/12/2006.
- [85] Li Y., Liang C., Slemenda C. W., Ji R., Sun S., Cao J., Emslev C. L., Ma F., Wu Y., Ying P., Zhang Y., Gao S., Zhang W., B. Katz P., Cao S. et Jonhston Jr. C. C. Effect of of long-term exposure to fluoride in drinking water on risks of bone fractures. *J. Bone Miner. Res.* 2001; 5 (16): 932-939.
- [86] Ministère de la santé et du bien-être social. Inorganic fluorides. Pièces à l'appui inédites, sections liées à la santé, pour le rapport d'évaluation des substances d'intérêt prioritaire (1993), cité par la référence 15.
- [87] Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). Some aromatic amines, anthroquinones and nitrosocompounds, and inorganic fluorides used in drinking-water and dental preparations. Monogr. du CIRC: Eval, carcinog. Risks Chem. Hum 1982 ; cité par la référence 15.
- [88] Keller C. Fluorides in drinking water. Paper presented at the workshop on drinking water fluoride. Influence on hip fracture and bone Health, Bethesda, MD, 10 avril 1990, cité par la référence 15.
- [89] May D. S. et Wilson M. G. Hip fracture in relation to water fluoridation: an ecologic analysis. Paper presented at the workshop on drinking water fluoride influence on hip fracture and bone health, Bethesda, MD, 10 Avril 1990, cité par la référence 15.
- [90] Hodge H. C. et Smith F. A. Fluoride. Dans: Disorders of mineral metabolism. Vol. 1 Bonner F. et Colburn J. W. (Dir de Publ.) Academic Press, New York, NY 1981; 439-483, cité par la référence 15.
- [91] Schlesinger E. R., Overton D. E., Chase H. C. et Cantwell K. T. Newburgh-kingston caries-fluorine study. XIII. Pediatric findings after ten years. *J. Am. Dent. Assoc.* 1956; 52: 296-306, cité par la référence 15.
- [92] Mc Cauley H. B. et Mc Clure F. J. Effect of fluoride in drinking water on the osseous development of the hand and wrist in children. *Public Health Rep.* 1954; 69: 671-682, cité par la référence 15.
- [93] Leone L. C., Stevenson C. A., Hilbish T. F. et Sosman M. C. A roentgenologic study of a human population exposed to high-fluoride domestic water. *Am. J. Roentgenol.* 1955; 74: 874-885, cité par la référence 15.
- [94] Stevenson C. A. et Waston A. R. Fluoride osteosclerosis. *Am J. Roentgenol.* 1957; 78: 13-18, cité par la référence 15.
- [95] Sharma S. K. Toxicity of fluoride in parts of Indian subsurface water. (2001): 99-104.

- [96] Yu Y., Yang W., Dong Z. et coll. Changes in neurotransmitters and their receptors in human foetal brain from an endemic fluorosis area. *Chung Hua Liu Hsing Ping Hsueh Tsa Chih* 1996; 15: 257-259, cité par la référence 8.
- [97] Roholm K. Fluoride intoxication: a clinical-hygenic study with a review of the literature and some experimental investigations. London: H. K. Lewis 1937; p281, cité par la référence 8.
- [98] Mullenix P. J., P. K. Denbesten, A. Schunior et Kernan W. J. Neurotoxicity of sodium fluoride in rats. *Neurotoxicol. Teratol.* 1995; 17: 169-177, cité par la référence 8.
- [99] Yang W., Yu Y., Liu J. Protective effect of SOD inducer on the brain changes of chronic fluorosis. *Chinese Journal of Endemiology* 1998; 17: 101-104, cité par la référence 8.
- [100] Pang Y., Zhu P., Zhang S. et coll. Protective effect of magnesium and selenium on the damage caused to brain cells by Fluoride. *Chinese Journal of Endemiology* 1994; 13: 329-330, cité par la référence 8.
- [101] Zhang A., Zhu D. Effect of fluoride on the human foetus. *Chinese Journal of Endemic Prevention and Treatment* 1998; 13: 156-158, cité par la référence 8.
- [102] Shi J., Dai G. et coll. A study of the effects of fluoride on the human foetus in an endemic fluorosis area. *Chung Hua Liu Hsing Ping Hsueh Tsa Chih* 1990; 9: 10-12, cité par la référence 8.
- [103] Chen Z., Liu W., Su G. A study of the effects of fluoride on foetal tissue. *Chinese Journal of endemiology* 1990; 9: 345-346, cité par la référence 8.
- [104] Li X. S., Zhi J. L., Gao R. O. Effect of fluoride exposure on intelligence in children. *Fluoride* 1995; 28: 189-192, cité par la référence 8.
- [105] Zhao L. B., Liang G. H., Zhang D. N., Wu X. R. Effect of a high fluoride water supply on children's intelligence. *Fluoride* 1996; 29: 190-192, cité par la référence 8.
- [106] Ren D. L., Liu Y., An Q. An investigation of intelligence development of children aged 8-14 years in high flouride and low iodine areas. *Chinese Journal of Control of Endemic Deseases* 1989; 4: 251-254, cité par la référence 8.
- [107] Li Y., Li X., Wei S. Effect of excessive fluoride intake on mental work capacity of children and a preliminary study of its mechanism. *Hua His I Ko Ta Hsueh Hsueh Pao* 1994; 25: 188-191, cité par la référence 8.
- [108] Fluor et activité de la glande thyroïde. (Source internet)
http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/eff_thyroïde.html
 Consulté le 27/11/2006.
- [109] Gorlitzer Von Mundy V. Influence of fluorine and iodine on the metabolism, Particulary on the thyroid gland. *Muenchener Medicishe Wochenschrift* 1963; 105: 182-186, cité par la référence 108.

- [110] Benagiano A. Effect of sodium fluoride on thyroid enzymes and basal metabolism in the rat. *Annali Di Stomatologia* 1965; 14: 601-619, cité par la référence 108.
- [111] Donald Hillman et coll. Hypothyroidism and anemia related to fluoride in Dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 1979; 62 (3): 416-423, cité par la référence 108.
- [112] Stole V. et Podoba J. Effect of fluoride on the Biogenesis of thyroid hormones. *Nature* 1960; 188 (4753): 855- 856, cité par la référence 108.
- [113] Galletti P. et Joyet G. Effect of fluorine on thyroid iodine metabolism. 1958; 18: 1102-1110, cité par la référence 108.
- [114] Fluor et cancer. (Source internet)
<http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/cancer.html>
Consulté le 27/11/2006.
- [115] Fluor et cancer. (Source internet)
http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/eff_cancer_os.html
Consulté le 27/11/2006.
- [116] Messer H. H., Armstrong W. D. et Singer L. Influence of fluoride intake on reproduction in mice. *J. Nutr.* 1973; 103: 1319-1326, cité par la référence 15.
- [117] Tao S. et Suttie J. W. Evidence for lack of an effect of dietary fluoride level on reproduction in mice. *J. Nutr.* 1976; 106: 1115-1122, cité par la référence 15.
- [118] Pillai K. S., Mathai A. T. et Deshmukh P. B. Effect of fluoride on reproduction in mice. *Fluoride* 1989; 24: 165-168, cité par la référence 15.
- [119] Susheela S. K. et Kumar A. A study of the effect of high concentrations of fluoride on the reproductive organs of male rabbits, using light and scanning electron microscopy. *J. Reprod. Fertil.* 1960; 92: 353-360, cité par la référence 15.
- [120] Chinoy N. J. et Sequeira E. Effect of fluoride on the histoarchitecture of the reproductive organs of the male mouse. *Reprod. Toxicol.* 1989; 3: 261-267, cité par la référence 15.
- [121] Chinoy N. J. et Sequeira E. Fluoride induced biochemical changes in reproductive organs of male mice. *Fluoride* 1989; 22: 79-85, cité par la référence 15.
- [122] Kour K. et Singh J. Histological finding of mice testes following fluoride ingestion. *Fluoride* 1980; 13: 160-162, cité par la référence 15.
- [123] Aschengrau A., Zierler S. et Cohen A. Quality of community drinking water and the occurrence of spontaneous abortion. *Arch. Environ. Health* 1989; 44: 283-290, cité par la référence 15.
- [124] Zierler S., Theodore M., Cohen A. et Rothman K. J. Chemical quality of maternal drinking water and congenital heart disease. *Int. J. Epidemiol.* 1988; 17: 589-594, cité par la référence 15.

[125] Aschengrau A., Zierler S. et Cohen A., Quality of community drinking water and the occurrence of late adverse pregnancy out-comes. Arch. Environ. Health 1993; 48: 105-113, cité par la référence 15.

[126] Freni S. C. Exposure to high fluoride concentrations in drinking water is associated with decreased birth rates. J. Toxicol. Environ. Health 1994; 42: 109-121, cité par la référence 15.

[127] Glenn F. B., Glenn W. D. et Duncan R. C. Fluoride tablet supplementation during pregnancy for caries immunity: a study of the offspring produced. Am J. Obstet. Gynecol. 1989; 143: 560-564, cité par la référence 15.

[128] Fluor et synthèse du collagène. (Source internet)
http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/eff_collagene.html
Consulté le 27/11/2006.

[129] Susheela A. K. et Mohan Jha. Effects of fluoride on cortical and cancellous Bone composition. IRCS Medical Sciences: Library Compendium 1981; 11 (9): 1021-1022, cité par la référence 128.

[130] Sharma Y. D. Effect of sodium fluoride on collagen cross-link precursors. Toxicological Letters 1982; (10): 97-100, cité par la référence 128.

[131] Susheela A. K. et Mukerjee D. Fluoride poisoning and the effect of collagen Biosynthesis of osseous and nonosseous tissue. Toxicological European Research 1981; 2 (3): 99-104, cité par la référence 128.

[132] Sharma Y. D. Variations in the metabolism and maturation of collagen after fluoride ingestion. Biochemica and Biophysica Acta 1982; (715): 137-141, cité par la référence 128.

[133] Drozd M. et coll., "Studies on the, influence of fluoride compounds upon connective tissue. Metabolism in growing rats" and "Effect of sodium fluoride with and without simultaneous exposure to Hydrogen fluoride on collagen metabolism. Journal of Toxicological Medicine 1984; (4): 151-157, cité par la référence 128.

[134] Fluor et dégénérescence des tissus. (Source internet)
http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/eff_degenerescence.html
Consulté le 27/11/2006.

[135] Taylor A. et Taylor N. C. Effect of sodium fluoride on tumor growth. Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine 1965; (119): 252, cité par la référence 134.

[136] Gibson S. Effect of fluoride on immune system function. Complementary Medical Research 1992; (6): 111-113, cité par la référence 134.

[137] Wilkinson P. Inhibition of the immune system with low levels of fluorides. Testimony before the Scottish High Court in Edinburg in the case of Mc coll vs. Strathclyde. Regional Council 1982; 17723-18150, 19328-19492, and exhibit 636, cité par la référence 134.

- [138] Allman D. W. et Benac M. Effect of inorganic fluoride salts on urine and cyclic AMP concentration in vivo. *Journal of Dental Research* 1976; (55 supplement B): 523, cité par la référence 134.
- [139] Jaouni S. et Allman D. W. Effect of sodium fluoride and aluminium on adenylate cyclase and phosphodiesterase activity. *Journal of Dental Research* 1985; (64) : 201, cité par la référence 134.
- [140] Fluor, Diabète et insuffisance rénale (Source internet)
http://www.Presselibreinternationale.com/fluor/SANTE/eff_diabete.html
 Consulté le 27/11/2006.
- [141] Dièye A., Diop C. M., Rumeau M. Les procédés de défluoruration des eaux de boisson. *Tribune de l'Eau* 1994; 568 (2) : 27-34.
- [142] Lagaude A., Kirsche C. et Travi Y. Défluoruration des eaux du Sénégal, travaux préliminaires sur l'eau du forage de Fatick. *T S M-EAU* 1988; 9 (83) : 449-452.
- [143] Ndao I., Lagaude A., Travi Y. Défluoruration expérimentale des eaux souterraines du Sénégal par le sulfate d'aluminium et le polychlorosulfate basique d'aluminium. *Sciences et Techniques de l'eau* 1992; 3 (26) : 243-249, cité par la référence 141.
- [144] Mazounie P. et Mouchet P. Procédés d'élimination du fluor dans les eaux alimentaires. *Revue française des Sciences de l'eau* 1984; (3) : 29-51, cité par la référence 141.
- [145] Choi W. W. et Chen K. Y. The removal of fluoride from waters by adsorption. *Journal AWWA* 1979; (10): 562-570.
- [146] Skripach T. et coll. The removal of fluorine and arsenic from the wastewater of the Rare-Earth Industry Proc. 5th Intern. Conf. water pollution Res. Vol 2 Pergamon Press, Elmsford, NY 1971, cité par la référence 145.
- [147] Hingston F. J., Posner A. M. et Quick J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite: I. The role of the portion in determining adsorption envelopes. *Soil Sci.* 1972; 2 (23): 177, cité par la référence 145.
- [148] Chidambaram S., Ramanathan A. L. et Vasudevan S. Fluoride removal studies in water using natural materials. *Water SA* 2003; 3 (29): 339-343.
- [149] Kailash C. A., Sunil K. G. et Akhilendra B. G. Development of new low cost defluoridation technology (KRASS). *Wat. Sci. Tech.* 1999; 2 (40): 167-173.
- [150] Gupta S. K. A process of defluoridation of water by a filter bed using indigenous materiel. *J. Environ. Sciences* 1997; (1): 149-156, cité par la référence 149.
- [151] Tahaikt M., Achary I., Menkouchi M. A. S., Amor Z., Taky M., Alami A., Boughriba A., Hafsi M., Elmidaoui A. Defluoridation of Moroccan groundwater by electrodialysis continuous operation. *Desalination* 2006; 189: 215-220.

[152] Diawara C. K. Abattement en fluor par nanofiltration d'eaux de boisson en France et au Sénégal. Rapport final de Stage Vivendi Water- Anjou Recherche – Laboratoire de chimie minérale et analytique. 19/02/02 – 25/10/02, 33p.

[153] Tahaikt M., Habbanil R. E., Ait Haddou A., Achary I., Amor Z., Taky M., Alami A., Boughriba A., Hafsi M., Elmidaoui A. Fluoride removal from groundwater by nanofiltration. Desalination 2007; 212: 46-53.

[154] Diawara C. K., Paugam L., Pontié M., Schlumpf J. P., Jaouen P. et Quémeneur F. Influence of Chloride, Nitrate and Sulphate on the Removal of Fluoride Ions by Using Nanofiltration Membranes. Separation Science and Technology 2005; 400: 3339-3347.

[155] fluorose dentaire (source Internet): <http://www.fluoridealert.org/dental-fluorosis.htm>, consulté le 26 Août 2006.

[156] fluorose osseuse (source Internet) :
<http://www.fluoridealert.org/health/bone/fracture/clinical-trials.html>, consulté le 26 Août 2006.

[157] Diawara C. K. Contribution à l'étude de la rétention du fluor et de métaux lourds en solution par des procédés membranaires de nanofiltration et d'ultrafiltration. Application à des eaux de boisson de France et du Sénégal à des solutions de métaux lourds. Thèse de Doctorat d'Etat, mention Chimie minérale et Analytique (2003), 162p ; Université Cheikh Anta DIOP de DAKAR, Faculté des Sciences et Techniques.

Résumé :

L'eau est une substance fondamentale utilisée dans le domaine de l'industrie, de l'agriculture et de la consommation humaine. Bien qu'abondante au niveau du globe terrestre, elle reste très peu exploitée. En réalité, les eaux souterraines constituent les principales ressources pour les besoins de la consommation humaine dans beaucoup de pays, notamment ceux en développement. Ces eaux souterraines sont très souvent contaminées par des éléments chimiques tel que le fluor. L'excès de fluor dans l'eau de boisson est noté dans beaucoup de pays du monde. La consommation de telles eaux engendre des problèmes graves de santé publique telle que la fluorose dentaire, la fluorose osseuse, un effet sur l'intelligence des enfants...etc.

Pour faire face aux problèmes liés à l'excès de fluor dans l'eau de boisson, le traitement a été préconisé comme moyen adéquat. Ainsi, les méthodes chimiques classiques nécessitant l'ajout de réactifs chimiques et celles physico-chimiques ou à membrane ne nécessitant pas l'ajout de réactifs ont été proposées pour le traitement de l'excès de fluor dans l'eau destinée à la consommation humaine.

En tenant compte de l'efficacité et du coût du traitement, l'adsorption dans des colonnes et la nanofiltration semblent être des méthodes appropriées pour les eaux du bassin arachidier du Sénégal où en plus de l'excès de fluor, il est aussi noté une salinité excessive.

Mots clés : Fluor, santé, eau de boisson saumâtre, procédé.