

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

CENTRE DE THIES

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

GC.0041

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

**Sujet : PROBLEMATIQUE DU FLUOR DANS L'ALIMENTATION EN
EAU POTABLE DU SENEGAL**

ANALYSE DE LA SITUATION - PROPOSITION DE SOLUTIONS

Présenté par : Fatou SAMB

**Encadreurs : M. Sana FATY
M. Amadou SARR**

ANNEE UNIVERSITAIRE 2003/2004

DEDICACES

A mon père, Papa Ibra SAMB

A ma mère, Oumoukfiayri FALL,

Pour toute l'éducation qu'ils m'ont donnée et pour m'avoir soutenue et

encouragée tout au long de mon cursus,

A mes frères et sœurs, toute ma reconnaissance,

A toute ma famille.

CITATION

" Les Objectifs de développement du Millénaire ne se limitent pas à la pénurie et l'accès à l'eau. La qualité de l'eau est un élément aussi important dans l'évaluation de la disponibilité en eau. Une eau qui ne convient pas à un besoin particulier revient à pas d'eau du tout".

Dr Richard Robarts

REMERCIEMENTS

Nous ne saurons présenter ce travail sans remercier au préalable un certain nombre de personnes, sans lesquels ce travail n'aurait eu lieu. Nous citerons tout particulièrement :

- M. Habib NGOM, directeur de l'E.S.P., pour nous avoir facilité la formation.

- M. Babacar NDIAYE, chef de département du Génie Civil, pour nous avoir facilité les démarches effectuées dans le cadre du projet ainsi que l'accès à certains documents.

- M. Amadou SARR et M. Sana FATY, professeurs à l'Ecole Supérieure Polytechnique qui ont accepté de nous encadrer. Nous leur sommes extrêmement reconnaissantes de la disponibilité dont ils ont fait montre à notre égard.

- Mme Adou Thiaw GAYE, responsable du laboratoire d'assainissement des eaux pour son concours précieux.

Nous témoignons toute notre reconnaissance à l'A.S.E.L.F.A.E. qui nous a beaucoup aidé dans l'accomplissement de notre formation.

Enfin, nous ne saurons clore cette page sans adresser tous nos remerciements à l'ensemble des professeurs qui ont participé à notre formation mais également à toutes les personnes qui ont de près ou de loin participé à la rédaction du présent document.

RESUME

Le Sénégal est situé à l'extrême ouest du continent africain, dans la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Dans ce contexte marqué par des aquifères fortement chargés en fluorures, la fluorose dentaire et osseuse touche une large population. Cette étude a donc pour objectif de proposer des solutions adaptées au contexte socio-économique du pays. Plusieurs méthodes de traitement du fluor existent. Certaines sont encore en phase de test, d'autres ont été appliquées à travers le monde. Il s'agit ainsi d'une étude bibliographique sur ces méthodes, la plus grande partie de la documentation étant constituée d'articles consultés sur Internet. Il a été retenu que les méthodes de défluoruration domestiques basées sur l'utilisation de la poudre d'os, de l'alumine activée et des sels d'aluminium, méthodes utilisées avec succès dans les régions de l'Inde et en Tanzanie trouvaient leur place dans un pays économiquement limité et dominé par une forte population rurale. En réalité, il n'existe pas de matériau qui réponde de façon optimale à tous les critères (bonne qualité de défluoruration, faible coût et facilité de mise en œuvre). Le choix d'un matériau et la conception de dispositifs de défluoruration résulteront d'une étude d'optimisation de ces procédés où la principale exigence concerne le respect des normes de potabilité en vigueur dans le pays.

Mots-clés : fluor, fluorures, Sénégal, eau, défluoruration

ABSTRACT

Senegal is situated in the extreme west of the African continent, in the meridional part of senegalo-mauritanian sedimentary basin where groundwater aquifers contain excessive fluoride. In many such areas, dental and skeletal fluorosis cause serious problem among local population. The purpose of this study is to investigate appropriate methods for defluoridation of drinking water in Senegal. Various defluoridation methods have been tested in order to avoid endemic fluorosis. Therefore, this study consists in bibliographical research of solutions to remove the excess of fluoride in drinking water, taking care about financial and technological constraints. It has been found that domestic defluoridation, using activated alumina, bone char and aluminium salt were used successfully in the area of India, Tanzania. Therefore these methods should be used for removing fluoride in the country, where a large part of the population affected by the disease lives in rural areas; another fact being the economical constraints. In fact, there is no method satisfying all the criteria (good defluoridation capacity, low price, ease of handling). The choice of material and conceptual of defluoridation processes on mechanisms will depend on further optimization study which will take into consideration the respect of permissible limits of the quality of drinking water.

Keywords : fluoride, defluoridation, water, Senegal

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Fluorose sur denture temporaire	16
Figure 2 : Fluorose dentaire modérée	16
Figure 3 : Fluorose dentaire sévère	16
Figure 4 : Fluorose dentaire sévère	16
Figure 5 : Genu Varum	16
Figure 6 : Tibias en lame de sabre	16
Figure 7 : Genu Valgum	16
Figure 8 : Genu Valgum unilatéral	16
Figure 9 : Déformation du rachis à type de cypho-scoliose	17
Figure 10 : Déformation du rachis à type d'hyperlordose lombaire	17
Figure 11 : Déformation du rachis à type de cyphose dorsale	17
Figure 14 : Pays affectés par l'excès de fluorures dans les eaux de consommation	18
Figure 15 : Distribution spatiale des différentes familles géochimiques dans le maastrichtien du Sénégal.....	18
Figure 16 : Répartition des teneurs en fluorures au niveau des aquifères	19
Figure 17 : Evolution des teneurs en fluorures de 1990 à 2002.....	19
Figure 18 : Capacité de défluoruration de différents adsorbants chimiques	29
Figure 19 : Histogramme représentant les capacités de défluoruration de différents adsorbants chimiques	29
Figure 20 : Classification de certains matériaux selon le procédé utilisé	30
Figure 21 : Utilisation d'un dispositif utilisant une pompe manuelle	38
Figure 22 : Dispositif de défluoruration utilisant la technique de Nalgonda.....	38
Figure 23 : Dispositif de défluoruration domestique utilisant le noir animal	39
Figure 24 : Fours utilisés pour la fabrication du noir animal	39
Figure 25 : Appareils de broyage des os calcinés	40
Figure 26 : Défluoruration à travers une colonne contenant du noir animal.....	40
Figure 27 : Dispositif domestique utilisant le charbon d'os.....	41
Figure 28 : Type de défluorurateurs domestiques.....	41
Figure 29 : Différentes types de conception des défluorurateurs domestiques.....	42

LISTE DES ABREVIATIONS

- O.M.S. : Organisation Mondiale de la Santé
- S.D.E : Société Des Eaux
- S.O.N.E.E.S. : Société Nationale d'Exploitation des Eaux du Sénégal
- S.O.N.E.S. : Société Nationale des Eaux du Sénégal
- E.N.S.U.T. : Ecole Nationale Supérieure Universitaire de Technologie
- U.C.A.D. : Université Cheikh Anta Diop de Dakar
- E.S.P. : Ecole Supérieure Polytechnique
- E.P.T. : Ecole Polytechnique de Thiès

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	i
LISTE DES ABREVIATIONS.....	ii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Première partie : PROBLEMATIQUE DU FLUOR DANS L'EAU DE CONSOMMATION SITUATION AU SENEGAL ET DANS LE MONDE	
1.1. Introduction.....	2
1.2. Caractéristiques du fluor.....	2
1.2.1. Nature du fluor	2
1.2.2. Le fluor dans la nature	3
1.2.3. Toxicité aiguë du fluor	4
1.2.4. Sources d'ingestion du fluor	4
1.3. Fluor, eau et santé.....	5
1.3.1. Contexte historique.....	5
1.3.2. Effet du fluor sur l'organisme.....	6
1.3.3.- Norme relative à la consommation du fluor.....	9
1.4. Le fluor dans le monde.....	9
1.5. Le fluor au Sénégal.....	11
1.5.1. Contexte hydrogéologique.....	11
1.5.2. Distribution géographique et géologique des teneurs en fluorures.....	12
1.5.3. Origine du fluor.....	14
1.5.4. Impacts sanitaires.....	15
1.6. Conclusion.....	20
Deuxième partie : BIBLIOGRAPHIE DU TRAITEMENT DU FLUOR	
2.1. Introduction	21
2.2. Les procédés de défluoruration et leurs applications.....	21
2.2.2 Procédés physico-chimiques	21
2.2.1. Procédés chimiques.....	23

2.2.3. Applications.....	25
2.3. Expériences menées dans le monde.....	31
2.3.1. Les méthodes membranaires.....	31
2.3.2. Les méthodes chimiques.....	31
2.3.3. Recharge de nappes souterraines.....	37
2.4. Expériences menées au Sénégal.....	43
2.5. Conclusion.....	46

Troisième partie : PROPOSITIONS DE SOLUTIONS – PERSPECTIVES

3.1. Introduction.....	47
3.2. Analyse de la situation	47
3.3. Choix de techniques de défluoruration.....	50
3.4. Choix de matériaux pour la défluoruration	51
3.5. Conclusion.....	53
CONCLUSION.....	54
RECOMMANDATIONS	55
LEXIQUE	56
BIBLIOGRAPHIE.....	59
WEBLIOGRAPHIE	62

INTRODUCTION GENERALE

Au Sénégal, les eaux souterraines constituent la principale source d'alimentation en eau potable malgré l'apport des lacs et des fleuves. Elles sont, en général, dénuées de pollution bactérienne, organique et microbiologique. Cependant, malgré leur rôle de filtre, les couches géologiques traversées par l'eau entraînent une minéralisation de celles-ci. L'eau ainsi stockée au niveau des nappes, bien que débarrassée d'une grande partie des impuretés, contient des éléments qui, au-delà d'une certaine teneur, compromettent considérablement la potabilité de l'eau.

Certains aquifères du Sénégal, notamment les nappes du Maastrichien, du Paléocène et de l'Eocène exploitées dans les régions de Fatick, de Kaolack, de Diourbel et de Thiès, renferment des eaux à fortes concentrations en fluorures, environ 2 à 13 mg/l. Des conséquences sont alors observées sur la santé des populations de ces zones. En effet, si à faibles doses, le fluor prévient la carie dentaire, à fortes doses ($> 1,5$ mg/l), il entraîne des manifestations telles que la fluorose dentaire et osseuse. Cependant, les méthodes de traitement du fluor dans l'eau de consommation existent, bien qu'elles ne soient pas encore explorées dans le pays.

L'objectif de ce projet est donc de trouver des solutions qui permettent de réduire de façon conséquente les teneurs en fluorures des eaux du Sénégal et cela sur la base de la documentation existante. L'approche sera plutôt généraliste et basée sur une analyse bibliographique, la plus fournie possible, des méthodes de traitements jusqu'à présent adoptées dans le monde. Ce qui permettra d'avoir une vue étendue afin de choisir les solutions qui conviennent tout en tenant compte du contexte socio-économique du pays.

Ce rapport présentera ainsi dans un premier temps, la problématique du fluor dans l'eau potable pour ensuite exposer les méthodes de traitement qui existent. La troisième partie sera consacrée à la proposition de solutions pour le Sénégal en nous fondant sur les éléments qui nous paraissent les plus pertinents. Certains détails relatifs à une meilleure compréhension de l'exposé figureront en annexe.

Première partie

**PROBLEMATIQUE DU FLUOR DANS L'EAU DE
CONSOMMATION**

SITUATION AU SENEGAL ET DANS LE MONDE

1.1. INTRODUCTION

De manière générale, l'excès de certains produits chimiques dans l'eau est à l'origine de graves problèmes de santé. C'est le cas de l'aluminium (maladie d'Alzheimer), de l'arsenic (cancers cutanés), du cadmium (effets neurologiques) mais aussi des fluorures. Ces dernières sont à l'origine de graves pathologies connues sous le nom de fluoroses (fig. 1 à 13) dont le degré de gravité est fonction croissante du taux d'ingestion de cet élément. De nombreux pays possèdent des eaux dont la concentration en fluorures dépasse largement la norme O.M.S. qui est de 1,5 mg/l. Des zones de fluorose endémique sont alors observées à travers le monde. Le nombre de personnes affecté est estimé à plus de 70 millions [45].

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons essentiellement aux caractéristiques de cet élément ainsi qu'à sa répartition à travers le monde et au Sénégal.

1.2. CARACTERISTIQUES DU FLUOR

1.2.1. Nature du fluor

Le fluor F_2 (symbole F, numéro atomique 9, masse molaire 18,998 g, rayon atomique 0.64 Angströms) est un gaz jaune pâle, d'odeur caractéristique voisine de celle de l'ozone, qui se liquéfie au voisinage de la température de l'azote liquide et se solidifie vers $-220\text{ }^\circ\text{C}$. Il a été produit et isolé pour la première fois en 1886 par le français Henri MOISSAN.

Il appartient à la famille des halogènes en plus du brome (B), du chlore (Cl), de l'iode (I) et de l'astate (At). Pour obtenir une configuration électronique stable à l'instar des gaz rares, il ne manque à chacun des éléments de ce groupe (possédant sept électrons sur leur couche périphérique) qu'un seul électron. Ils sont donc très actifs du point de vue chimique.

Le fluor a sept électrons sur sa couche périphérique. C'est l'halogène le plus électronégatif de tous les éléments ; c'est par conséquent un oxydant extrêmement puissant. Il réagit sur l'eau pour former l'oxygène et l'acide fluorhydrique, ainsi qu'un peu d'ozone ($F_2 + H_2O \leftrightarrow 2HF + 1/2O_2$). La réaction qui dégage de l'hydrogène H_2 , est explosive. Il décompose avec violence les halogénures hydrogénés, avec dégagement gazeux de l'halogène. Il attaque pratiquement tous les métaux sauf l'or, le platine et l'iridium qui résistent à la température ordinaire.

Du fait de sa réactivité, le fluor n'existe pratiquement jamais à l'état libre mais sous forme de fluorures en association avec d'autres éléments (fluorure de calcium, d'aluminium, de sodium, etc.). En effet, il gagne naturellement un électron en passant à l'état très stable d'ions fluorures. *C'est principalement pour cette raison qu'on parle de présence de fluorures dans le sol, dans les eaux ou dans les aliments mais jamais de présence de fluor.* Les fluorures forment des complexes ioniques métalliques solubles dans l'eau pour la plupart sauf les complexes formés avec l'aluminium, le plomb, le magnésium insolubles ou difficilement solubles.

1.2.2. Le fluor dans la nature

Sous forme de combinaisons, le fluor est relativement abondant dans le règne minéral. Il occupe le 13^e rang des éléments rencontrés dans la nature et constituerait environ 0.078% de l'écorce terrestre. Il serait donc plus abondant que le chlore, beaucoup plus que des métaux comme le cuivre ou le plomb. Le fluor est aussi présent dans le soleil et les nébuleuses. Les gaz volcaniques sont assez riches en composés fluorés. Dans la biosphère, on le rencontre dans les os ; dans le règne végétal, il est rare.

Dans les minéraux, il peut se présenter sous différentes formes :

- en tant qu'élément majeur de minéraux appartenant principalement au groupe des halloïdes, des phosphates et des silicates (topaze, fluorine, cryolithe) ;
- en tant qu'élément mineur, en occupant les sites cristallographiques réservés aux groupes OH⁻ (et plus difficilement O₂ et Cl⁻). Dans ce cas, l'ion F⁻ peut se partager l'occupation du site avec OH⁻ (série isomorphe hydroxyl-apatite-fluor-apatite) où il n'occupe qu'une faible partie du site comme dans certains silicates (phyllosilicates, biotite, muscovite, chlorite, amphiboles) ;
- sous forme libre ; il est alors rare, semble-t-il, en inclusion dans les édifices cristallins, mais adsorbé en quantité notable dans les minéraux argileux.

La fluorine ou spath-fluor CaF₂ est la principale source de fluor à l'état naturel. Sa teneur en fluor est d'environ 49% [40]. Ce minéral est largement réparti dans le monde et les réserves connues sont très importantes. *C'est d'ailleurs à l'utilisation de la fluorine comme fondant métallurgique que le fluor doit son étymologie, le verbe latin fluere signifiant couler.* La cryolithe naturelle AlF₆Na₃ constitue une autre source de minerai riche en fluorures avec une

teneur approximative de 54%. Les roches phosphatées contiennent par contre, sous forme de fluorapatite $\text{CaF}_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, des quantités variables mais faibles (3 à 4%) de fluor.

1.2.3. Toxicité aiguë du fluor

Le fluor est toxique, ses dérivés sont plus ou moins nocifs suivant qu'ils sont sous forme organique ou minérale, et sous forme liquide ou gazeuse. L'acide anhydre est extrêmement dangereux et peut provoquer des brûlures graves, difficiles à guérir. L'acide aqueux paraît moins dangereux, mais une aspersion même légère, entraîne des brûlures et des abcès purulents très douloureux et à guérison lente. En dehors de ces toxicités aiguës, il y a également les toxicités dues aux excès de fluorures dans les eaux de boisson, ou par dispersion dans l'atmosphère de composés fluorés par certaines industries : aluminium, magnésium, superphosphates.

1.2.4. Sources d'ingestion du fluor

Le fluor présent dans l'organisme peut provenir de différentes sources que sont :

- *les aliments* : beaucoup d'aliments contiennent des fluorures, mais en faibles quantités ; les plus riches sont les produits de la mer (poissons, crustacés, coquillages) et le thé ;
- *les médicaments* : divers médicaments contiennent des quantités appréciables de fluorures tels que les comprimés fluorés ;
- *les poussières* : dans les régions phosphatières, l'ingestion de quantités importantes de fluorures peut être due à l'inhalation des poussières riches en cet élément et à l'utilisation de végétaux contaminés par ces poussières ;
- *l'eau* : l'eau de pluie contient toujours une certaine quantité de fluorures provenant soit directement de l'eau de mer, soit de l'atmosphère contenant des poussières provenant des sels fluorés, des fumées industrielles, des foyers domestiques (surtout ceux utilisant le charbon). La solubilité des fluorures après rejet en mer, la solubilité totale est essentiellement due au complexe formé avec les ions magnésium. Les eaux de surface peuvent contenir des fluorures provenant des rejets industriels et autres. Mais l'enrichissement de cet élément dans l'eau de consommation se fait surtout par la solubilisation des roches fluorées au cours de la pénétration en profondeur des eaux de ruissellement.

1.3. FLUOR, EAU ET SANTE

1.3.1. Contexte historique

L'existence d'une relation entre la présence de fluorures dans les eaux souterraines et la santé des populations consommant cette eau a depuis longtemps été soupçonnée. Ce fut donc l'objet de plusieurs expériences et études qui ont permis de mettre en évidence ce phénomène.

En 1901, les observations cliniques très précises d'un professeur italien, CHIAIE et d'un jeune dentiste américain, EAGER montrent l'existence d'une relation entre l'eau de boisson des environs de Naples, et des anomalies atteignant la morphologie dentaire, qui sévissaient à l'état endémique dans cette région, et connues sous le nom de « denti di chiaie » ou émail tacheté [18]. Leurs observations furent confirmées en 1916 par BLACK et MCKAY (auteurs américains d'un traité de dentisterie restauratrice) qui ont démontré la relation entre l'émail tacheté et l'eau de boisson.

C'est à partir de 1930 que l'attention fut portée sur le fluor. Il a été alors constaté dans la région de Colorado Spring, que l'organisme qui présentait ces taches avait en réalité, subi un développement de ces dents dans un milieu dans lequel l'eau présentait 2,5 à 3 mg/l de fluor. En 1931, quatre chercheurs américains appartenant à deux équipes scientifiques (CHURCHILL, SMITH, LANTZ et SMITH) ont montré de façon indépendante et quasi-simultanée que le facteur dans l'eau de boisson, responsable de cette atteinte hypoplasique de l'émail, était d'une concentration relativement importante, mais encore faible de fluorures [26].

En 1933, DEAN fournit la preuve que chez les sujets présentant de l'émail légèrement tacheté, dans les régions où l'eau était modérément fluorée à un degré optimal de 1 mg/l, il était possible d'obtenir une importante action protectrice à l'égard de la carie sans risque d'hypoplasie [26].

Après le travail classique de BLACK (1916) poursuivi par DEAN et Coll. (1939), il a été établi que les individus ayant longuement résidé dans des régions où l'eau courante contenait 1mg/l d'ions fluorures, présentaient approximativement 50% de caries que ceux des groupes de contrôle non fluorés [18]. Entre 1939 et 1943, MC CLURE a pu préciser qu'en

consommant quotidiennement de l'eau renfermant 1mg/l de fluor et en tenant compte de la composition des régimes alimentaires moyens, l'homme ne s'exposait à aucun danger, une action préventive est menée à l'égard de la carie dentaire.

Ces observations permettent de retenir deux choses principales :

- à faibles doses, le fluor prévient la carie dentaire ;
- au-delà d'une certaine teneur, le fluor décolore les dents (fluorose dentaire) ;

Ainsi des foyers de fluorose (atteintes des dents et du squelette due à l'ingestion de fluor) ont été décrits un peu partout : aux Indes en 1940, en Finlande en 1964, en Suède en 1974, à Cuba, en 1976, en Italie du Sud, au Maroc, en Tunisie, en Grèce, en Tanzanie etc.

Au Sénégal en particulier, c'est en 1957 qu'a été décrit pour la première fois un foyer de fluorose dentaire à MT ROLLAND dans la région de Thiès [27].

1.3.2. Effet du fluor sur l'organisme

Le fluor peut avoir plusieurs effets sur l'organisme. Ces derniers se produisent essentiellement au niveau des dents et des os. En effet, c'est principalement au niveau de ces parties que les fluorures transportés par les vaisseaux sanguins se fixent, le surplus étant éliminé par les reins.

Les fluorures sont rapidement absorbés au niveau intestinal. Ils sont d'abord distribués de la même façon que les chlorures et demeurent presque totalement dans le compartiment extracellulaire. Ils s'accumulent normalement en petites quantités seulement dans les os, les dents et les cartilages. La quantité de fluorures présente dans ces tissus, dépend de plusieurs facteurs, dont l'âge et la durée d'ingestion. Dans les tissus mous, cette quantité est en général très faible et n'augmente pas avec l'âge. La plus grande partie des fluorures qui échappe à l'incorporation dans les os et les dents est excrétée rapidement dans les urines.

Il peut apparaître ainsi des troubles du tissu osseux, par inclusion de fluorure de calcium dans le phosphate de calcium constituant les os. Le fluorure de calcium a des propriétés chimiques

voisines de celles du phosphate de calcium, qui est le principal constituant des os et de l'émail des dents. Il donne une structure plus dure et plus cassante. Dans un premier temps, la dureté de l'émail des dents est améliorée par la présence de fluorures, mais au-delà d'une certaine proportion, la structure se détériore, l'émail des dents est détruit et les os deviennent plus cassants.

La présence de fluor dans l'organisme a donc des effets aussi bien positifs que négatifs suivant les conditions dans lesquelles il a été absorbé :

- Prévention de la carie dentaire

Le fluor est jusqu'à présent le principal élément connu pour son effet cariostatique. En effet, la consommation continue d'une eau fluorée peut être bénéfique, à faibles doses. Le fluor agit en se combinant aux apatites qui entrent dans la composition de l'émail dentaire. La substitution progressive et continue de l'ion OH⁻ par l'ion fluor F⁻ va contribuer à la formation d'un cristal fluoro-apatite. Cette modification de la composante minérale de l'os entraîne une augmentation de la résistance de la dent aux processus cariogènes. De plus, les ions fluorures, en se combinant avec certaines substances (carbonates), forment de nouveaux composés chimiques qui résistent bien aux attaques des acides et des bactéries responsables de la carie dentaire.

- Fluorose dentaire

Elle désigne une lésion dischromique et structurale des tissus durs de la dent (émail dentine et cément) à la suite d'une consommation quotidienne d'une eau contenant plus de 2 mg/l pendant les années de formation des dents temporaires et permanentes (de 0 à 8ans). La sévérité des lésions dépend de la durée d'exposition, du stade de l'activité des améloblastes, de la dose et de la susceptibilité individuelle. Elle est caractérisée par des tâches blanchâtres, ternes et opaques au niveau de l'émail. Celui-ci peut être strié, moucheté, grêlé et coloré du jaune au brun noir selon la sévérité (fig.1 et fig. 2). En plus de ce problème esthétique très handicapant, on peut observer des puits et de larges zones d'hypoplasie qui transforment la morphologie de la dent (fig. 3 et fig. 4).

- Fluorose osseuse

Connue encore sous le nom d'ostéose fluorée, elle résulte d'une intoxication massive (>4mg/l) et surtout prolongée (10 à 20 ans). Elle se traduit par des changements au niveau de

l'os : augmentation de la densité osseuse, calcification aux points d'insertion des muscles et exostoses osseuses. Cette fluorose se manifeste par des douleurs articulaires et/ou une ankylose des articulations d'où le nom de « fluorose ankylosante ». Toutefois, ce n'est qu'après 2 ans au moins d'exposition pour des concentrations hydriques supérieures à 3 mg/l que les symptômes apparaissent.

Au début, la symptomatologie est muette en ce qui concerne les manifestations osseuses, ensuite, on peut distinguer deux stades :

- un stade avancé où la fluorose se manifeste par de vagues douleurs osseuses et articulaires au niveau des mains, des genoux, des pieds et du rachis ;
- un stade beaucoup plus avancé où on note une raideur évidente du rachis avec limitation des mouvements et plus tard une apparition possible d'une cyphose (fig. 11). La marche devient difficile et une dyspnée due à la rigidité de la cage thoracique peut survenir.

- *Manifestations neurologiques*

Les manifestations neurologiques sont la conséquence de la fluorose osseuse et elles se définissent comme étant une radiculomyélopathie. Elles comportent :

- des manifestations radiculaires à type d'acroparesthésie associée à une fonte musculaire et des douleurs irradiant le long des racines nerveuses. Il est possible d'avoir aussi une asthénie, une atrophie musculaire par manque d'exercice, des fasciculations et des fibrillations musculaires.
- des manifestations myélopathiques qui résultent principalement du rétrécissement du canal rachidien par compression de la moelle en un ou plusieurs points. L'évolution se fait vers une quadriplégie spastique. Le terme ultime est la cachexie qui entraîne la mort.

1.3.3. Norme relative à la consommation du fluor

La dose optimale de fluorures correspond à la teneur permettant la prévention de la carie dentaire tout en limitant au maximum les risques de fluorose dentaire. C'est une dose qui dépend de plusieurs facteurs, notamment le climat. En effet, elle n'est pas la même en zone tempérée ou en zone tropicale chaude.

Selon l'O.M.S., la dose optimale de fluorures dans l'eau de boisson à travers le monde varie entre 0,7 et 1,2mg/l. Des études effectuées au Sénégal ont montré plus précisément que la dose probable était de **0,8 mg/l** (Annexe 1.5).

1.4. LE FLUOR DANS LE MONDE

Une grande proportion de pays, connaît une présence de concentration en fluorures supérieure à 1,5 mg/l (norme O.M.S) dans les eaux souterraines. Dans les années 80, une estimation montrait déjà que près de 260 millions de personnes dans le monde consommaient une eau contenant plus de 1 mg/l de fluor. Une étude récente [45] effectuée sur la cinquantaine de pays possédant une référence concernant la présence de fluorures dans leurs eaux, montre que le problème de la fluorose endémique concernerait à l'heure actuelle, environ 30 pays répartis à travers les cinq continents (fig. 14) ; le total de la population mondiale atteinte de fluorose excéderait les 70 millions.

Au Mexique, la fluorose endémique affecterait autour de 5 millions d'habitants [11].

En Inde, les mêmes travaux ont montré que des teneurs en fluorures supérieures à 1 mg/l se rencontreraient fréquemment sur le territoire avec des maxima de 20 mg/l et que la fluorose affecterait autour de 25 millions de personnes dont 1 million de fluorose osseuse et invalidante.

De même en Russie, des eaux fortement chargées se rencontreraient dans les bassins artésiens de la plate-forme russe, le bassin artésien de Yatkysty, les bassins du Sud de l'Oural ainsi que dans les formations granitiques du Kazakhtan et la « région des eaux thermales ».

En France, ce sont les bassins sédimentaires (bassin parisien et bassin d'Aquitaine) qui sont les plus chargés en fluorures.

Aux Etats-Unis, les limites déterminées à partir des plus fortes valeurs rencontrées montrent que le seuil de 1,5 mg/l est franchi dans de nombreuses régions. La valeur maximum rencontrée est de 28 mg/l [11].

En Tchécoslovaquie, les fortes teneurs en fluorures sont très nettement liées aux granites de cristallisation tardive (greisens). Dans les roches métamorphiques et magmatiques acides, les concentrations restent comprises entre 0,2 et 0,7 mg/l [11].

En Afrique du Sud, les teneurs supérieures à 1 mg/l se regroupent dans des massifs granitiques bien déterminés. Deux valeurs exceptionnelles entre environ 67,2 et 35,2 mg/l, y sont signalées. Des concentrations fortes (12 mg/l) mais plus isolées sont présentes dans les formations sédimentaires [11].

Au Japon, la fluorose a été identifiée depuis longtemps dans le Nord-Est de la région des « Rokko Mountains ». Les eaux de surface contiennent entre 0,1 et 3 mg/l, les eaux souterraines 2 à 6 mg/l. Les eaux les plus riches en fluorures se localisent sur le substratum granitique où les teneurs de l'eau et de la roche varient parallèlement [11].

En Italie, les valeurs sont généralement faibles (< 0,3 mg/l), excepté sur les terrains volcaniques près de Rome (maximum 4 mg/l).

En Irlande du Nord, une vingtaine de mesures dépassent 1 mg/l (maximum 5 mg/l).

En Pologne [11] ; sur l'ensemble du territoire, presque entièrement occupé par le bassin sédimentaire oligo-miocène, 6 eaux de consommation sur les 304 analysés contiennent plus de 1 mg/l de fluorures.

D'après TRAVI, des cas de fluorose ont été également reconnus :

- En Angleterre, dans différents comtés du bassin de Londres ;
- Au Vietnam, bien que les teneurs soient relativement faibles ;
- En Afrique de l'Est, Ouganda, Tanzanie, Soudan et Kenya ;

- En Chine, en particulier dans l'Est du pays (concentrations fréquentes 1,5 à 3 mg/l, parfois > 5 mg/l).

Plusieurs études ont été menées pour expliquer le phénomène [11]:

En France, les analyses statistiques ont mis à jour le rôle prépondérant des niveaux calcaire-marneux ou sablo-argileux dans la minéralisation en fluorures des eaux. Dans les bassins de Moscou et de Moldavie, l'examen pétrographique et géochimique des roches réservoirs a mis en évidence la présence de phosphates dans le Précambrien supérieur, le Paléozoïque, le Mésozoïque et le Cénozoïque, tandis que de la fluorine est observée dans le Précambrien. Par ailleurs, une relation directe a été observée entre les teneurs en F^- et PO_4^{3-} des horizons néogènes et crétacés. Ce lien constitué de gisements de phosphates riches en fluorures, a été établi sans équivoque dans les nappes du Cénomaniens et de l'Ordovicien du massif bohémien de Tchécoslovaquie ainsi que dans les aquifères dolomitiques du Tennessee aux USA. Cependant, les tentatives de corrélation avec les éléments de l'analyse chimique aboutissent à des résultats variés, parfois contradictoires bien qu'une association de fortes teneurs en fluorures associées aux eaux alcalines et bicarbonatées sodiques, est souvent signalée.

1.5. LE FLUOR AU SENEGAL

1.5.1. Contexte hydrogéologique

Le Sénégal est constitué dans sa plus grande partie par un vaste bassin sédimentaire qui occupe les trois quarts de sa superficie. Le bassin sédimentaire se compose de séries secondaires et tertiaires, épaisses à l'Ouest (8000 m) et se biseautant vers l'Est sur un substratum précambrien et paléozoïque qui affleure à l'extrémité orientale du pays. Les aquifères exploités se rencontrent à partir du sénonien supérieur selon deux grands ensembles [11]:

- un *ensemble inférieur* profond et homogène : la nappe « maastrichtienne » ; cette nappe captive d'une épaisseur moyenne de 250 m est rencontrée entre 50 et 500 m sous la surface du sol et s'étend sur la quasi-totalité de la partie sédimentaire du Sénégal ;

- un *ensemble supérieur* hétérogène, carboné ou détritique, constitué d'aquifères superficiels ou semi-profonds aux relations souvent mal définies. Il est formé de trois unités hydrogéologiques :
 - les sables littoraux, entre Dakar et Saint-Louis, d'épaisseur relativement faible en général ;
 - les sédiments carbonatés du Paléocène et de l'Eocène sont peu épais, discontinus et subaffleurants ;
 - les formations détritiques de l'Oligo-Miocène.

Par ailleurs, il faut distinguer trois grandes unités géochimiques [6] (fig.15):

- la « zone Est », à l'est du méridien 15°30', caractérisée par des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes (type 1a), de faible salinité, croissant lentement vers l'Ouest pour devenir progressivement des eaux bicarbonatées sodiques et potassiques (type 1b), de salinité légèrement plus élevée (350 à 650 mg/l). Ces eaux peuvent devenir localement, des eaux sulfatées sodiques et potassiques (type 1c), caractérisées par une concentration ionique totale légèrement plus élevée (600 à 750 mg/l).
- la « zone centrale salée », axe N-S partant de l'embouchure du Sine-Saloum jusqu'au lac de Guiers, est caractérisée par la présence des eaux chlorurées sodiques (type 2) à minéralisation élevée (750 à 3500 mg/l).
- la « zone Ouest », à l'Ouest de la falaise de Thiès (au niveau du Horst de Ndiass) est caractérisée par des eaux bicarbonatées, généralement de faible minéralisation, pouvant être localement contaminées par des eaux de type chlorurées sodiques en provenance des intrusions marines.

1.5.2. Distribution géographique et géologique des teneurs en fluorures

Au Sénégal, la découverte, en 1957 d'un foyer de fluorose dentaire à MONT ROLLAND (Région de Thiès) attribuée aux eaux de l'aquifère du Maastrichtien, a été le point de départ de l'analyse systématique du fluor lors de la mise en service des ouvrages de captage

importants. Cependant, il a fallu attendre les années 1980 pour avoir une vision précise des teneurs en fluorures dans les principaux aquifères du bassin sénégalais [16].

Le fluor est présent en quantité décelable dans pratiquement tous les aquifères et parfois avec des concentrations équivalentes ou supérieures à certains ions majeurs de l'analyse chimique tel que le calcium [6]. Les teneurs en fluorures rencontrées varient fortement dans le sens vertical entre les différents aquifères et latéralement au sein d'un même aquifère. Les nappes des formations quaternaires et de la partie supérieure du Miocène contiennent très peu de fluorures alors que les aquifères du Maastrichien, du Paléocène, de l'Eocène et de l'Oligo-Miocène présentent des teneurs relativement fortes, supérieures à 1mg/l, atteignant 13 mg/l dans le réservoir paléocène de la région de Mbour [11].

Pour donner une idée assez précise de la répartition des teneurs en fluorures, les données utilisées dans le cadre du rapport de synthèse sur la nappe maastrichienne au Sénégal [6] (788 points de mesure compilés), ont été reprises afin de faire la cartographie sur le logiciel Arcview des teneurs en fluorures au Sénégal (fig. 16). Elle permet d'entrevoir la zone délimitée comme étant la Zone de Fluorose Endémique ou Z.F.E.. Cette zone recouvre les régions de Fatick, Diourbel, Kaolack et une partie des régions de Thiès et de Louga. Elle est aussi identifiée à côté de quelques endroits le long du fleuve Sénégal (Matam). Cette ZFE recouvre une superficie de 21 000 km² avec plus de 1,5 millions d'habitants.

A propos de la région Est, TRAVI (1993) note que la teneur en fluorures des eaux diminue en s'éloignant de la ZFE vers l'Est jusqu'à devenir inexistante. La pauvreté en fluorures de l'eau de boisson des régions Est et Sud s'explique par le fait que ces régions sont arrosées par les fleuves (Gambie et Casamance) et leurs affluents. De plus, ces régions sont situées sur les contreforts du Fouta Djallon, réservoir de l'Afrique de l'Ouest avec une pluviométrie importante, ce qui permet la dilution du fluor dans les nappes aquifères.

Pour NDIAYE (1994), 18% de la population sénégalaise consomment une eau hyperfluorée, 62% une eau hypofluorée et 20% une eau normofluorée selon les normes de l'O.M.S. Cependant, du fait de la diversité des sources d'approvisionnement en eau de boisson (eau souterraine ou eau de surface), le risque de consommer une eau hyperfluorée n'est pas le même dans une même région ou d'une région à une autre. Dans les régions où l'on rencontre des teneurs élevées dans l'eau de boisson, ce risque varierait d'environ de 0,3% à 39%. Il

serait de 15% dans la région de Thiès, 25% dans les régions de Diourbel et de Louga, 34% dans la région de Kaolack, 39% dans la région de Fatick.

1.5.3. Origine du fluor

La cartographie des teneurs en fluorures dans le bassin indique que les fortes valeurs se localiseraient dans les zones montrant des indices phosphatés (MONCIARDINI, 1966) et dans les zones de gisement avérées. Plus précisément, du point de vue stratigraphique, la présence des fluorures est établie dans tous les aquifères où du phosphate a été signalé.

C'est le cas dans la zone de Mbour-Thiès-Diourbel-Fatick où des eaux très chargées en fluorures circulent dans un paléokarst situé sous une couche quasi continue de sédiments phosphatés ; la concentration en fluorures chute dès l'interruption de cette couverture. Par ailleurs, les zones de Bambey et de Louga sont marquées par la présence de marnes phosphatées [11].

En effet, d'après les études de TRAVI, il est admis que les eaux souterraines se chargeraient en fluor après lessivage des roches phosphatées probablement par dissolution incongruente des fluor-carbonates-apatites. La saturation des eaux vis-à-vis de la fluorine constitue un fait aussi prépondérant dans la migration du fluor.

Lorsque la saturation en fluorine est réalisée, l'évolution du fluor est sous la dépendance de l'équilibre de solubilité $[Ca^{++}][F^-]^2 = CaF_2$ qui lui-même dépend du fonctionnement chimique de la nappe, en particulier de l'équilibre des eaux avec la calcite et le gypse. C'est le cas de la partie ouest de la nappe du Maastrichien où les échanges de base dans une eau saturée en calcite diminuent les teneurs en Ca^{++} avec comme conséquence une augmentation de F^- .

1.5.4. Evolution des taux de fluorures

Les taux de fluorures des eaux souterraines sont en constante variation. Ils sont plus élevés en saison sèche. Après la saison des pluies, les eaux sont moins chargées mais les concentrations en fluorures restent toujours aussi élevées par rapport aux normes. Des données fournies par la S.D.E. sur les eaux de certains forages permettent de faire quelques observations. Elles font notamment état d'une fluctuation des teneurs d'année en année avec une baisse générale des concentrations en fluorures.

1.5.5. Impacts sanitaires

Plusieurs enquêtes donnent des informations sur les affections présentes dans différentes régions. Il a été constaté que la fluorose dentaire était présente dans tous les villages où la concentration de fluorures dans l'eau consommée est supérieure à la normale [12] ; surtout chez les enfants âgés de moins de 10 ans.

Les manifestations osseuses les plus rencontrées sont [12] : par ordre de fréquence décroissante : le *genu varum* (fig. 5), le tibia en sabre (fig. 6), le *genu valgum* (fig. 7), le *genu recurvatum*, la déformation du rachis (fig. 11),

Bien que peu signalés (maximum 4 cas dans les villages visités) [13], des cas de fluorose osseuse ont été décrits dans des localités avec des doses de fluorures de plus de 7 mg/l. Les sujets sont des impotents physiques car souvent c'est la colonne vertébrale qui est immobilisée ou ce sont les canaux naturels de passage des nerfs et vaisseaux qui sont obstrués par le fluor par un processus de densification et ces éléments sont ainsi insupportables pour le sujet.

Certains villages, comme N'gargarlam, sont particulièrement touchés : le taux de prévalence a atteint 61% pour la fluorose dentaire et 42.6% pour la fluorose osseuse.

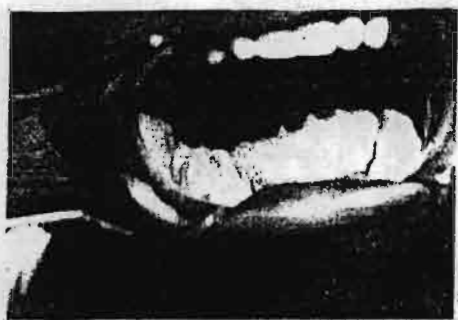


Figure 1 :
Fluorose sur denture temporaire



Figure 2 :
Fluorose dentaire modérée



Figure 3 :
Fluorose dentaire sévère

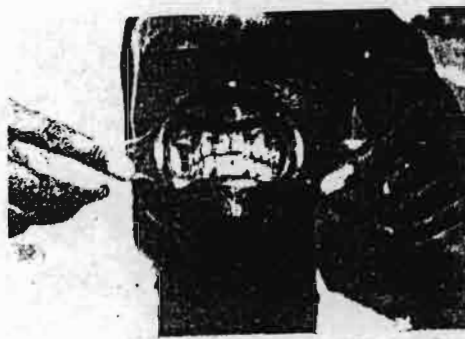


Figure 4 :
Fluorose dentaire sévère



Figure 5 :
Genu Varum



Figure 6 :
Tibias en lame de sabre



Figure 7 :
Genu Valgum



Figure 8 :
Genu Valgum unilatéral

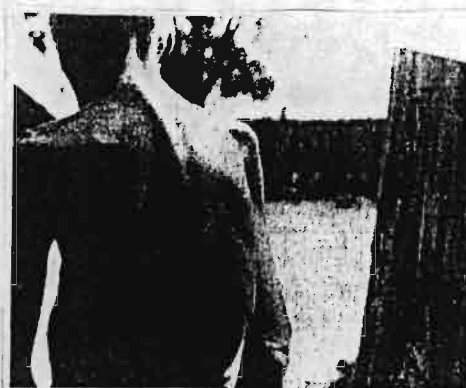


Figure 9 :
Déformation du rachis à type de cypho-
scoliose



Figure 10 :
Déformation du rachis à type
d'hyperlordose lombaire



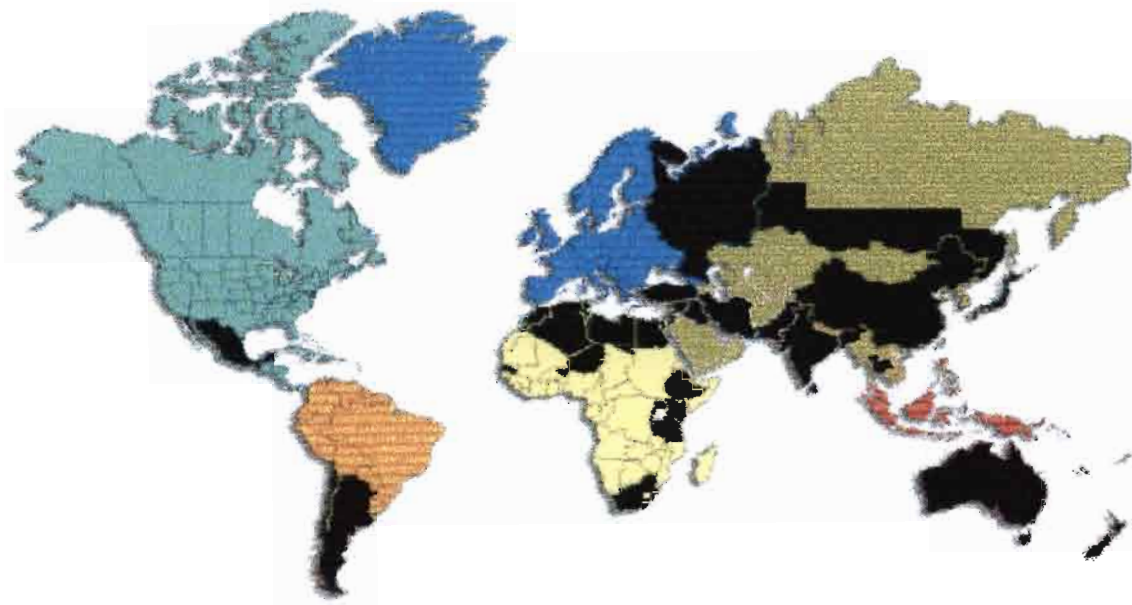
Figure 11 :
Déformation du rachis à type de
cyphose dorsale



Figure 12 :
Nodule sous-cutané de
l'avant-bras droit



Figure 13 :
Nodule sous-cutané du 3^{ème} orteil du
pied gauche



- | | | | |
|--|-----------------------------|--|--------------------------------------|
|  | Région I, Afrique |  | Régions IV, Amérique du Nord et Cent |
|  | 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.

Figure 14 : Pays affectés par l'excès de fluorures dans les eaux de consommation

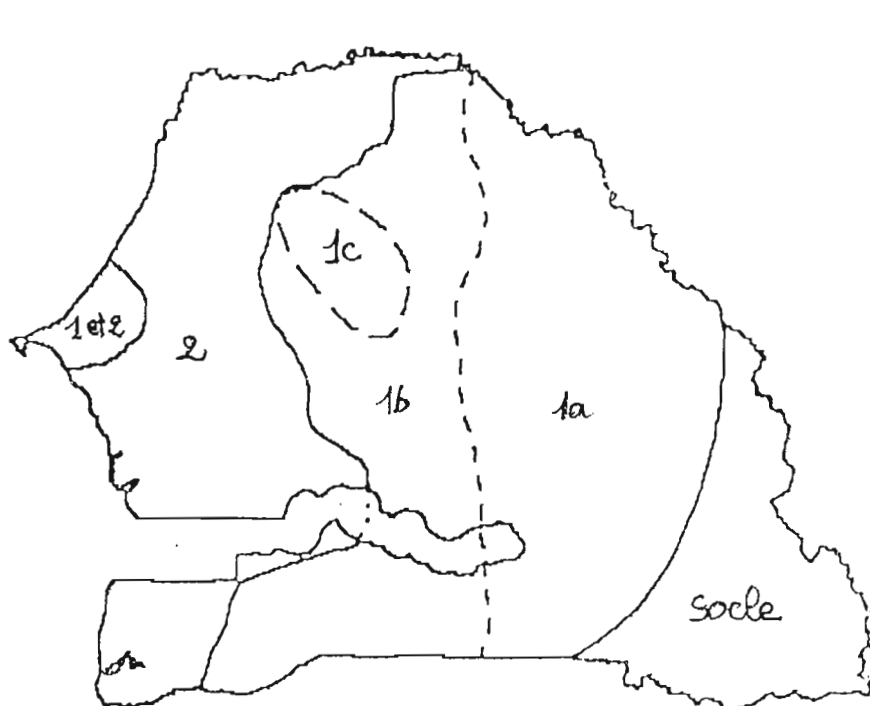


Figure 15 : Distribution spatiale des différentes familles géochimiques dans le maastrichien du Sénégal

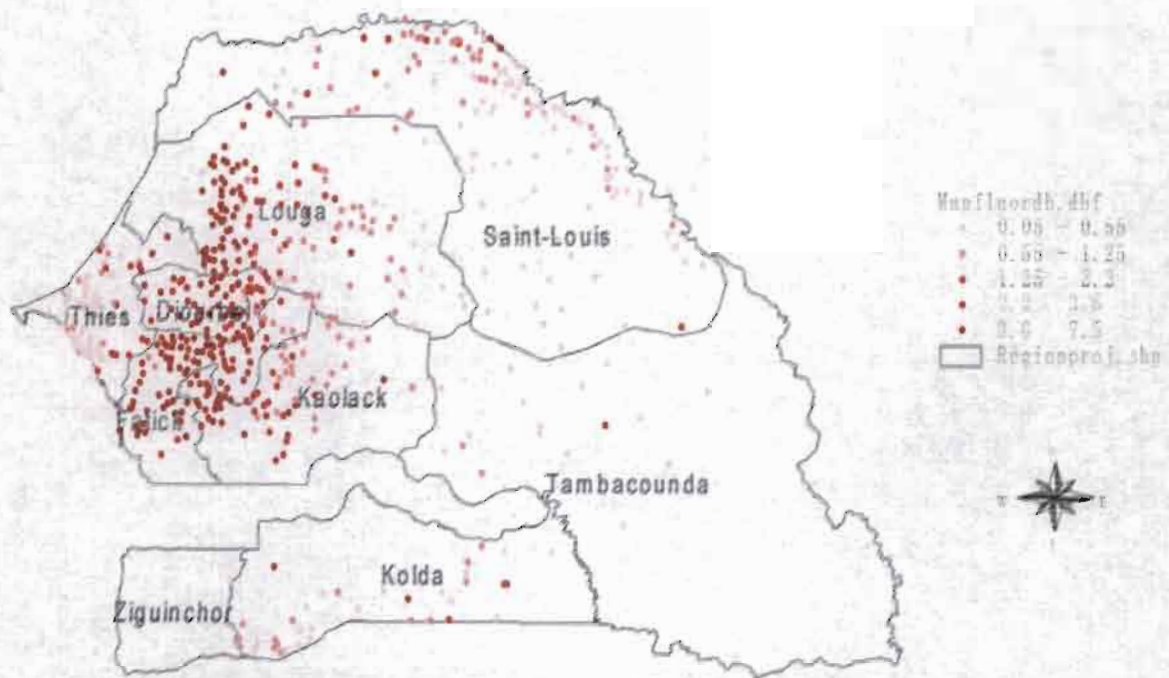
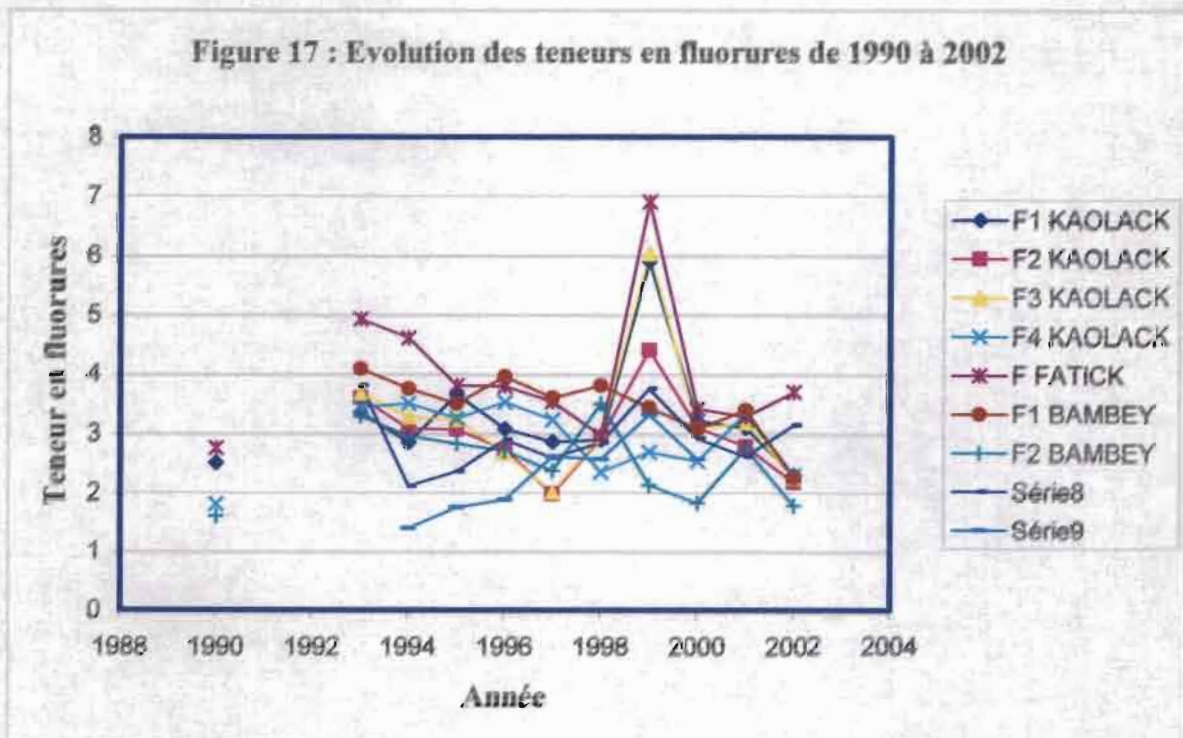


Figure 16 : Répartition des teneurs en fluorures au niveau des aquifères



1.6. CONCLUSION

Les problèmes posés par la présence d'un excès de fluorures dans l'eau potable sont donc très nombreux. Ceci est d'autant plus grave que les eaux souterraines constituent une source incontournable pour les populations touchées. Au Sénégal, aucune solution véritable n'a été appliquée jusqu'à présent. Il importe ainsi de trouver des solutions adéquates permettant de réduire la teneur en fluorures des eaux tout en se basant sur la technologie existante. Notre démarche s'inscrit dans ce cadre. Le chapitre suivant porte ainsi sur l'inventaire des méthodes de traitement qui existent à l'état actuel pour ensuite voir leur applicabilité au Sénégal.

Deuxième partie

BIBLIOGRAPHIE DU TRAITEMENT DU FLUOR

2.1. INTRODUCTION

Plusieurs méthodes de traitement du fluor existent. Elles vont aussi bien dans le sens de la réduction que de l'augmentation de la teneur en fluorures dans les eaux. En effet, de nombreux pays tels que la Suisse, les Etats-Unis et le Japon ont adopté une attitude préventive face à la carie dentaire en effectuant la fluoruration de plusieurs produits de consommation tels que le sel, le lait, les comprimés mais aussi l'eau. Ces méthodes sont cependant très critiquées de nos jours. Nous exposerons plus particulièrement les méthodes relatives à la réduction du taux de fluorures dans les eaux de consommation. Elles sont essentiellement de trois sortes :

- dilution de la teneur en fluorures au niveau des nappes d'eau souterraines;
- mélange des sources d'eaux hyperfluorées avec d'autres sources peu fluorées ;
- défluoruration des eaux fluorées par des méthodes chimiques ou physico-chimiques.

Dans ce chapitre, nous nous étendrons plus particulièrement sur les méthodes de défluoruration des eaux.

2.2. LES PROCEDES DE DEFLUORURATION ET LEURS APPLICATIONS

Elles se distinguent par leur capacité à enlever le fluor de l'eau, leur facilité d'application, leurs coûts et leur adaptabilité par rapport au contexte économique du pays (disponibilité des intrants, de la technologie etc.). On distingue d'une part les procédés académiques de défluoruration et d'autre part les techniques mettant en œuvre un ou une combinaison de ces procédés.

2.2.1. Procédés physico-chimiques ou à membranes

Les techniques à membrane peuvent être classées en deux catégories :

- composés qui passent à travers la membrane : soluté et solvant (dialyse) ;
- types de membranes et énergie mise en jeu, pour assurer le transfert du solvant et/ou des solutés (osmose, ultrafiltration etc.).

Leur application industrielle dépend en grande partie de leur sélectivité pour les ions fluorures et de la consommation énergétique afin de les rendre compétitifs.

- **Electrodialyse**

C'est une technique séparative qui permet un transfert sélectif des ions à travers des membranes à perméabilité sélective, sous l'action d'un champ électrique. Le but de l'opération est d'extraire les sels d'un solvant. Les sels contenus dans l'eau à traiter sont transférés, sous l'action du champ électrique, des compartiments de déconcentration vers les compartiments de concentration. On obtient alors d'un côté une saumure surconcentrée et de l'autre une eau épurée.

Cette technique de membrane a été la première utilisée (dans les années 60) ; elle est surtout intéressante pour le traitement des eaux saumâtres : en effet, le coût énergétique de l'électrodialyse est directement fonction de la quantité de sel à éliminer. L'application de l'électrodialyse à l'élimination de fluorures dans les eaux permet d'abaisser les teneurs aux normes fixées, mais l'inconvénient jusqu'ici est qu'il faut entièrement déminéraliser l'eau traitée avant de pouvoir éliminer les fluorures.

L'effet Donnan en dialyse permet aussi, à faible débit, une bonne rétention des ions fluorures. L'utilisation d'une membrane perméable aux anions pour séparer deux solutions d'électrolytes forts NaF et NaCl permet de transférer en quantité égale F^- et Cl^- . Cependant, la compétition avec les autres anions reste un inconvénient majeur [8].

- **Osmose inverse**

L'osmose connue depuis le VIII^e siècle, est un phénomène important dans la nature, qui n'a vu des applications, par l'osmose inverse, que dans la 2^{ème} moitié du XX^e siècle. Si d'un côté d'une membrane d'osmose, on a une solution concentrée et de l'autre, de l'eau pure (ou une solution diluée) pour égaliser les potentiels chimiques dus à la différence de concentration, l'eau qui peut seule traverser la membrane, va passer vers le côté concentré pour aller diluer cette solution. Le niveau de l'eau va donc monter du côté concentré jusqu'à ce que le potentiel chimique dû à la différence de pression égale exactement le potentiel chimique. Par contre, si on applique du côté du compartiment concentré une pression hydrostatique égale à la pression

osmotique, on empêche ainsi le phénomène d'osmose de se produire. Si cette pression est supérieure, on inverse le phénomène d'osmose et on fait passer de l'eau pure, depuis le milieu concentré vers le milieu dilué ; c'est l'**osmose inverse**. Ce procédé est très efficace pour éliminer la quasi-totalité des sels minéraux présents en solution (pas de sélectivité entre les sels).

- **Nanofiltration**

Des efforts de recherches réalisés de par le monde, ont permis la mise en œuvre de membranes d'osmose inverse ayant une moindre rétention en sels avec des propriétés telles que celles-ci peuvent traiter des eaux faiblement minéralisées à des pressions très basses (<20bars) et produisant une eau de minéralisation suffisante ne nécessitant pas de traitement ultérieur. Il s'agit de membranes dites de nanofiltration qui permettent d'arrêter toutes les espèces présentes en solution de diamètre moyen voisin du nanomètre et qui possèdent des poids moléculaires compris entre 100 et 500 daltons.

Ce type de membrane encore à l'étude devrait permettre de réaliser une rétention sélective de certains sels, tout en évitant l'étape de reminéralisation [12]. Ce qui permettrait une élimination préférentielle des fluorures en gardant une minéralisation suffisante à l'eau pour qu'elle soit directement potable.

2.2.1. Procédés chimiques

- **Echange d'ions**

L'échange d'ions est un procédé par lequel l'eau ou toute solution aqueuse est mise en présence d'un échangeur d'ions qui a la propriété d'extraire de cette solution par fixation, un type d'ions et de le remplacer par une quantité exactement équivalente d'un autre type d'ions de même charge. A la fin de l'opération, la résine doit être régénérée. Dans le cas de la défluoruration, le procédé utilise des résines ioniques ayant une affinité avec l'ion fluorure. Cependant, les résines sont souvent peu spécifiques aux ions fluorures; les résines anioniques fortes disponibles sur le marché mondial ne présentent qu'une faible capacité de fixation vis-à-vis des ions fluorures [13].

- Adsorption

L'adsorption se définit comme la propriété de certains matériaux à fixer sur leur surface interne ou externe des molécules qui sont ainsi retenues de façon plus ou moins irréversible. Il existe deux types d'adsorption :

l'adsorption physique, réversible, qui ne modifie pas l'identité chimique des molécules adsorbées ;

l'adsorption chimique, irréversible, qui se caractérise par des liaisons chimiques entre l'adsorbat et des sites d'adsorption spécifiques.

Il s'agit ainsi d'un phénomène de surface qui, dans le cas de la défluoruration, se réalise durant la filtration. La technique consiste donc à faire passer de l'eau à travers un lit filtrant caractérisé par son apport en réactif. Ce procédé est bien adapté à l'élimination spécifique des fluorures mais nécessite de maîtriser le pH du milieu [8]. La capacité d'adsorption dépend de la surface spécifique du matériau, de la nature de la liaison adsorbant-adsorbat et du temps de contact.

Des études sur la défluoruration des eaux par différents adsorbants : hydroxyde d'aluminium, charbon actif, apatite, charbon d'os et alumine activée, ont donné de meilleurs résultats pour l'alumine activée (fig. 18 et 19).

- Précipitation

La précipitation peut être définie comme le dépôt dans un liquide d'un corps insoluble qui repose alors par décantation au fond du récipient dans lequel a eu lieu la réaction. Les procédés de précipitation des ions fluorures sont basés sur la formation de composés insolubles à partir de ces ions et nécessitent une décantation et une filtration après coagulation. Il faut cependant tenir compte des excédents de réactifs de précipitation dans l'eau traitée qui peuvent en altérer la qualité ; ce qui nécessite des étapes supplémentaires de traitement. On peut favoriser la précipitation des ions fluorures sous forme de CaF_2 en ajoutant des sels de calcium, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 ou CaCl_2 . Cependant, du fait de la faible solubilité de la plupart des fluorures, il est difficile d'effectuer des traitements par précipitation de fluorures insolubles pour le traitement des eaux potables.

2.2.3. Applications

Les opérations de filtration, de séparation membranaire ont envahi le monde moderne et sont utilisées quotidiennement dans les industries où elles occupent une place de plus en plus importante. Cependant, du fait du coût élevé des opérations, ces techniques ont été peu appliquées pour la défluoruration des eaux de consommation. Les applications les plus courantes sont celles qui mettent en jeu un ou une combinaison de procédés chimiques. Les matériaux utilisés sont :

- **L'alumine activée (Al_2O_3 ou oxyde d'aluminium)**

Elle est obtenue par calcination à une température inférieure à 500 °C de l'alumine hydratée $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, elle-même obtenue par attaque alcaline de la bauxite. La technique utilisée met en oeuvre une percolation d'une eau chargée en ions F^- sur un lit d'alumine activée permettant la rétention de ces ions F^- . L'alumine activée fait partie des matériaux ayant la plus grande capacité de défluoruration (fig. 6). Elle assure de façon fiable une élimination spécifique de l'ion fluorure (>80%) avec de plus une élimination quasi-totale du fer présent dans la solution^[5]. Elle est pratiquement insoluble dans l'eau. Son affinité pour le fluor est grande. Cependant, le pH et l'alcalinité sont les facteurs affectent la capacité d'adsorption. Saturée en fluorures, l'alumine activée peut être soumise à une régénération par le sulfate d'alumine, la soude et l'acide sulfurique.

- **Les sels d'aluminium**

Principalement utilisés dans le traitement de l'eau dans le processus de la coagulation - floculation, ils permettent, suivant un processus défini comme étant une co-précipitation, la réaction des fluorures avec les hydroxydes formés lors de la phase de floculation ; ce qui amène ces molécules à décanter. Quand on ajoute un sel d'aluminium à une solution contenant des fluorures, il se produit d'abord une hydrolyse de l'aluminium. Ce qui provoque une acidification de la solution et une augmentation de la teneur en sulfates dans le cas du sulfate. Il y a co-précipitation de l'hydroxyde formé avec le fluorure d'aluminium, avec formation d'un oxyfluorure d'aluminium du type $AlOF$. Pour rendre l'eau potable, cette technique utilise de fortes concentrations en réactifs, ce qui augmente d'autant le coût du traitement. Parmi les sels, on peut distinguer :

- *le sulfate d'aluminium* : Sous forme de poudre granulométrique de 2,5 à 25 mm, il se dissout en milieu aqueux avec une apparition concomitante d'une co-précipitation d'hydroxyde et de fluorure d'aluminium. Sa formule générale est de : $Al_2(SO_4)_3, 18H_2O$. Cette méthode a fait l'objet de plusieurs études [4]. Il fait partie des premiers agents chimiques utilisés pour la défluoruration. Il est toujours utilisé, seul ou en combinaison avec d'autres produits chimiques comme agent défluorurant. En plus de la nécessité d'une quantité élevée de produit pour une faible teneur en fluorures, les teneurs en sulfates et en aluminium augmentent considérablement. Cette méthode peut réduire la concentration en fluor de 7,5 à 0,8 mg/l après 2 heures à pH compris entre 7,2 et 8,4. Cependant, le mélange du sulfate d'aluminium et de la chaux donne de meilleurs résultats que le sulfate seul. Par ailleurs, on peut aussi utiliser l'alun ou sulfate d'aluminium et de potassium, de formule $KAl(SO_4)_2, 12H_2O$. Il donne à peu près les mêmes résultats.
- *Les Polymères d'aluminium* : Ce sont des produits aux propriétés remarquables. Ils peuvent être classés en différents groupes :
 - polyhydroxychlorures d'aluminium (type PCBA),
 - polyhydroxychlorosilicates d'aluminium (type HERPIFLOC),
 - polyhydroxychlorosulfates d'aluminium (type WAC, PRODEFLOC),
 - polyhydroxychlorures mixtes (type PAC-10, PAC-18).

Ils peuvent être utilisés au même titre que le sulfate d'aluminium. Dans le cas du polychlorosulfate d'aluminium, la teneur en sulfates n'est pas modifiée à cause de son pouvoir floculant mais celle des chlorures s'élève de 28% environ par rapport à l'eau brute.

- **Le phosphate tricalcique**

L'affinité du fluor pour le phosphate tricalcique n'est plus à démontrer. Depuis longtemps, on trouve toujours des teneurs en fluor dans les phosphates naturels tels que les apatites, les phosphorites, de même que dans les os. On pense que dans l'apatite, de formule $3Ca_3(PO_4)_2, CaCO_3$, l'ion carbonate est remplacé par du fluor pour donner de la fluorapatite insoluble ($Ca_3(PO_4)_2, CaF_2$). Pour la défluoruration, on utilise dans la pratique soit des

produits tirés des os de bétail, soit de l'apatite synthétique. L'emploi de la poudre d'os est plus répandu et fait partie des toutes premières méthodes de défluoruration. La régénération peut se faire indéfiniment avec de la soude. On peut ainsi utiliser :

- *Les os naturels* : Les os séchés et broyés ont une capacité significative de défluoruration. Cependant, des problèmes bactériologiques et organoleptiques rendent cette technique moins attractive comparée à l'usage du charbon d'os ou du charbon synthétique.
- *Le noir animal* : C'est un solide granulaire noir obtenu en calcinant des os de bétail. Il est particulièrement utile pour l'enlèvement des métaux lourds tels que l'aluminium, l'arsenic, le cadmium, le chrome, le fer, le plomb et le zinc des eaux résiduaires. Il est également efficace pour l'extraction du fluor. L'utilisation du noir animal fait partie des premières méthodes proposées pour la défluoruration [4]. En effet, il était reconnu que le noir animal carbonisé à des températures de 1100-1600°C avait des qualités supérieures aux autres os non traités [4].
- *L'os synthétique* : L'os synthétique est un mélange du phosphate tricalcique et de l'hydroxyapatite produit en faisant réagir l'acide phosphorique et la chaux.

- *Le charbon actif*

Ce matériau peut donner de bons résultats ; la régénération se fait par la soude et le gaz carbonique. Il présente toutefois des restrictions, car il ne s'applique pas en milieu basique et requiert donc une très grande acidité. Ce qui fait d'ailleurs qu'il est très peu utilisé. Avec un pH de 3, le fluor peut être réduit de 8 à 1 mg/l [48]. Cependant, la méthode peut être coûteuse puisqu'il y a une nécessité d'abaisser dans un premier temps le pH pour ensuite l'élever pour les besoins de la consommation.

- *Le gel de tamarin*

La concentration en fluorures de 10 mg/l peut être réduite jusqu'à 2 mg/l par l'addition de gel de tamarin seul et à 0.05 mg/l par combinaison du gel et d'une petite quantité de chlorures [48].

- *La bauxite*

La bauxite a montré une bonne capacité de défluoruration. Cependant, il semble avoir une gamme de pH faible (3 à 5) bien qu'il soit employé un temps long et une grande quantité en bauxite. Une étude a montré que plus de 90% du fluor serait retenu avec un temps de contact de 4h de pH 5,5 à 7,0 avec une dose d'adsorbant de 25 g de bauxite [48].

- *La serpentine* : c'est le nom donné au matériau contenant les minéraux de chrysolite et d'antigorite. Le filtre ne peut pas être régénéré et doit être jeté après utilisation. La variété jaune donne de meilleurs résultats que la variété verte [48].

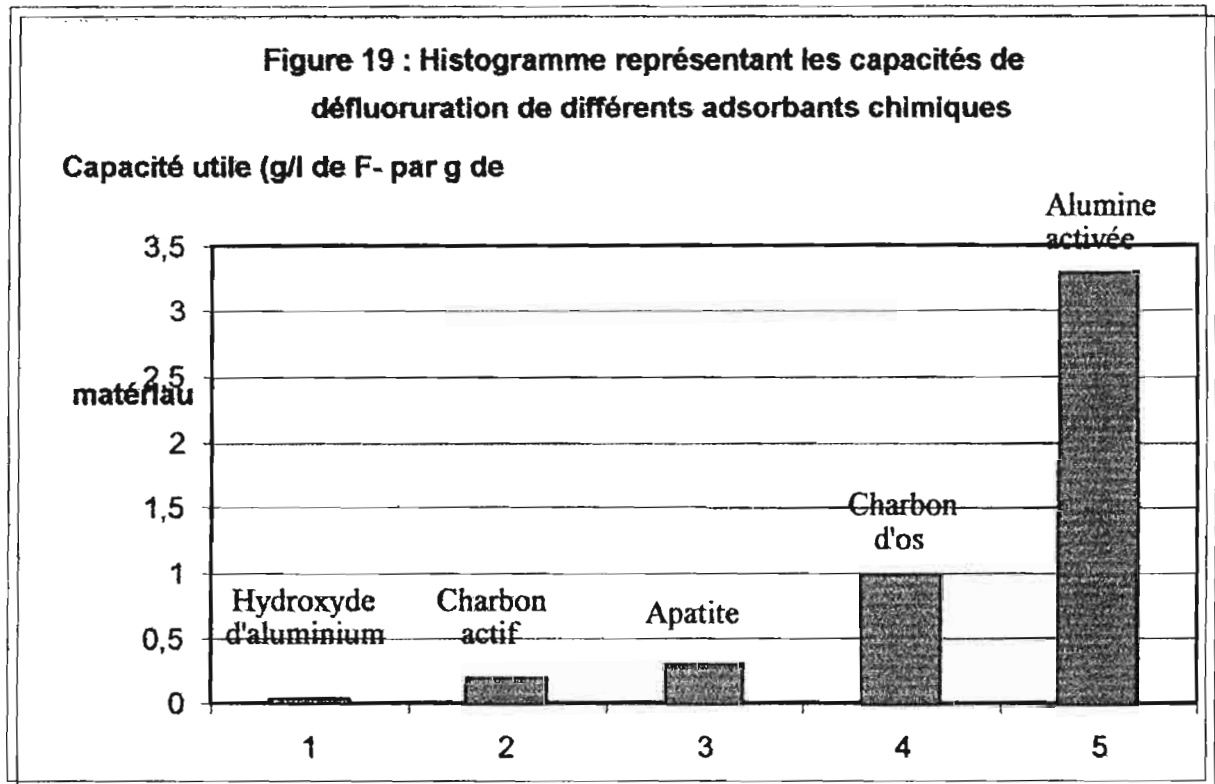
- *Les plantes*

Les matériaux basés sur l'utilisation des racines de *Moringa Oleifera* et *Emblica Officinalis*, les racines de *Vetiveria zizanoides* et les résidus de *Cyanodon tactylon* ont été trouvés comme étant de bons agents défluorurants. Le *Moringa oleifera* a été utilisé traditionnellement au niveau des zones rurales du Soudan. Les femmes des villages collectaient l'eau à partir du Nil, déposaient la poudre de graines dans un petit sac de tissu attaché par un fil. Le tout était ensuite agité pour faciliter la coagulation et la floculation [32]. L'eau traitée était ensuite bouillie pour être désinfectée, puis par la suite, consommée (Jahn, 1981).

En plus de ces matériaux, d'autres agents défluorants existent tels que : les ions ferriques (sulfate ferrique, chlorure ferrique), les sels de magnésium, le calcium, le phosphate de calcium, la bentonite, le silicate de sodium etc. Cependant, ils ne font pas l'objet d'un grand intérêt. En général, parce qu'il y a des méthodes plus appropriées disponibles, ils ne semblent pas convenir aux pays en voie de développement.

Capacité utile (g/l de F- par g de matériau)	0.05	0.2	0.3	1	3.3
Matériaux	Hydroxyde d'aluminium	Charbon actif	Apatite	Charbon d'os	Alumine activée

Figure 18 : Capacité de défluoruration de différents adsorbants chimiques [13]



Echange d'ions	Adsorption	Précipitation
Résine poly anionique de type NCL Tulsion A27 Lewatit-MIH-59 Amberlite IRA-400 Deaceodite FF-I Waso-resin-14 Polystyrène	Bois Lignite Charbon Os de bétail Résidus de pétrole Coques de noix Balles de riz Ecorce d'avaram Parche de café Cendres volantes Carbion Defluoron-1 Defluoron-2 Alumine activée Bauxite, Serpentine Argile Calcite	Chaux sulfate d'alumine chaux et sulfate d'alumine Polychlorure d'aluminium Poly hydroxy sulfate d'aluminium

Figure 20 : Classification de certains matériaux selon le procédé utilisé [44]

2.3. EXPERIENCES MENEES DANS LE MONDE

De nombreuses investigations ont été menées dans le monde pour résoudre ce problème. Certains matériaux sont encore en phase expérimentale, d'autres sont déjà utilisés aussi bien à l'échelle domestique qu'à l'échelle industrielle.

2.3.1. Les méthodes membranaires

Ces techniques n'auraient pas été très utilisées pour la défluoruration. Cependant, des études ont été effectuées notamment avec la dialyse de Donnan et la nanofiltration. Récemment, une étude effectuée au Maroc [37] a mis en œuvre un procédé hybride combinant l'adsorption sur des oxydes d'aluminium et de zirconium. Le pilote était équipé de membranes échangeuses d'anions utilisées couramment dans les procédés d'électrodialyse. La combinaison de l'adsorption et de la dialyse permettait de défluorer l'eau en mode continu. En plus de cela, les adsorbants n'étaient pas mis en contact direct avec l'eau traitée. Tous les anions, à l'exception des chlorures étaient partiellement éliminés et remplacé par des ions chlorures.

2.3.2. Les méthodes chimiques

Les expériences ayant été implantées de manière réussie dans différents pays seraient au nombre de trois :

1. Défluoruration par les sels d'aluminium (technique de Nalgonda)

Depuis 1961, plusieurs recherches ont été effectuées par le NEERI (National Environment Engineering Research Institute), en Inde, parmi lesquelles la technique de Nalgonda (du nom de la région où la méthode a été pour la première fois implantée) a été retenue comme la plus pertinente.

Cette méthode met en œuvre l'addition de sels d'aluminium, de la chaux et du chlorure de chaux pour les besoins de la coagulation, de la floculation, de la décantation, de la filtration et de la désinfection. La dose de chaux dépend de l'alcalinité de l'eau brute. Si l'eau brute présente une alcalinité adéquate, la chaux peut ne pas être utilisée. La réaction entre les

fluorures et les hydroxydes d'aluminium formés durant la floculation n'est pas bien connue et est considérée comme étant une sorte de co-précipitation.

Le sel d'aluminium le plus utilisé reste le sulfate d'aluminium malgré l'apparition depuis les années 70, du polychlorosulfate basique d'aluminium (PACS) ou polychlorure basique d'aluminium (PAC). Ces générations de produits ont des propriétés de floculants, ce qui fait que leur utilisation ne nécessite pas d'ajouts de ces produits (floculants). Ils sont aussi l'avantage d'être actifs sur une large gamme de pH. L'inconvénient réside cependant dans la teneur résiduelle d'aluminium dans l'eau.

La technique de Nalgonda a aussi été introduite sous forme de projets pilotes au Kenya, au Sénégal et en Tanzanie [31]. En Inde, elle est introduite à plusieurs échelles :

- *A l'échelle domestique* : Le dispositif est constitué de seaux en plastique de capacité 60 litres et de tamis. Les seaux sont munis d'un couvercle et d'un robinet placé dans leur partie basse à 5 cm au dessus. Le sel d'aluminium et la chaux sont ajoutés simultanément à l'eau brute en agitant lentement pendant 1 minute puis rapidement pendant 5 minutes. L'eau décantée puis filtrée à travers le tamis est ainsi apte à l'utilisation.
- *A l'échelle communautaire* : Pour les petites communautés (populations de 200 personnes en moyenne), le dispositif comprend un réservoir cylindrique d'une profondeur de 2 m équipé d'un mécanisme d'agitation manuelle (fig. 21). Par contre, s'il s'agit d'un grand village entier, le dispositif est composé de réacteurs, d'un réservoir surélevé, d'un local électrique et d'un local de stockage des produits chimiques (fig. 22).

Le procédé présente plusieurs avantages. En effet, il ne nécessite pas de régénération donc pas de manipulation de produits dangereux comme l'acide et la soude. Les produits chimiques sont disponibles sur le marché et le dispositif est simple à concevoir. De plus, la couleur, la turbidité et les bactéries sont en même temps éliminées.

Elle possède aussi certaines limites. En effet, elle n'est utilisable que pour certains types d'eau. Il s'agit d'eaux dont :

- le résidu sec est en dessous de 1500 mg/l; sinon la désalinisation peut s'avérer nécessaire ;
- la dureté totale est en dessous de 600 mg/l ; sinon, il faut une désalinisation ;
- l'alcalinité de l'eau doit être suffisante pour assurer l'hydrolyse complète de l'aluminium ajouté et retenir un minimum d'alcalinité entre 1 et 2 meq/l dans l'eau traitée pour obtenir un pH entre 6,5 et 8,5.
- les fluorures dans l'eau brute doivent être comprises entre 1,5 et 20 mgF/l.

2. Défluoruration par la poudre d'os

Nous avons vu préalablement que la défluoruration pouvait s'effectuer avec la poudre d'os provenant d'os naturels, de noir animal ou encore de produits synthétiques (cf. p.27). Le noir animal a été le plus utilisé. En effet, la calcination permet d'éliminer les matières organiques ainsi que les odeurs mais aussi d'augmenter la capacité de défluoruration. Le noir animal a été utilisé comme agent défluorant dans des installations du Sud du Dakota en 1948. Pour les besoins de la défluoruration domestique, cette méthode a été adoptée par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) et l'I.C.O.H. (Intercountry Centre for Oral Health) de Chiangmai, la faculté dentaire de l'université de Chulalongkorn de Bangkok. La technique est basée sur les processus d'adsorption et de filtration par le charbon et la poudre d'os calcinés.

Des systèmes de défluoruration à moyenne échelle et à l'échelle domestique ont été conçus et expérimentés dans certains pays. La figure 23 montre un type de défluorateur domestique [49]. Il est constitué d'un tube de 75 cm de long et 9 cm de diamètre muni d'un robinet sur sa partie inférieure et d'un trou au sommet pour la recirculation de l'eau. De bas en haut, on note une couche de charbon actif d'environ 300 g pour éliminer les odeurs, une couche de 1000 g d'os calcinés dans un four à 600°C pendant 20 mn et une couche de 200 g de cailloux pour éviter le flottement. Avec un débit de 4 litres par heure, la teneur en fluorures d'un volume de 480 litres d'eau de boisson passe de 5 mg/l en fluorure à 1 mg/l. Le filtre demeure actif durant 1 à 3 mois dépendamment du taux de fluorures contenu dans l'eau et la quantité d'eau consommée. Ce dispositif a été implanté dans certains villages de Nalgonda après quelques réticences dues à l'utilisation d'os de bétail. Ce qui constitue un inconvénient non négligeable pour l'application de la méthode malgré sa simplicité et son coût peu élevé. Elle a aussi été introduite en Thaïlande du Nord au niveau des ménages domestiques.

Au Kenya, c'est en 1998 qu'elle a été implantée aussi bien à l'échelle domestique qu'à l'échelle communautaire. En effet, de forts taux de fluorures avaient été observés dans certaines zones du pays comme par exemple dans le village de Mutaro où l'eau de puits avait une teneur en fluorures de 6 mg/l environ. Ces défluorateurs domestiques étaient constituées de seaux en plastique de capacité 40 litres munis de robinets et contenant 20 litres de poudre d'os.

A l'échelle industrielle, les os calcinés sont remplacés par des phosphates synthétiques qui sont des mélanges d'acide phosphorique et de chaux.

Pour la fabrication du noir animal, des fours de différentes capacités ainsi que des appareils de broyage et de tamisage des os calcinés (fig. 24 et 25) ont été utilisés ; les fours étant remplis de charbon de bois à un pourcentage de 8% de la quantité d'os. La calcination d'os de vache dans des fours de capacité 10 kg à 20 kg pouvait s'effectuer entre 6 heures et 8 heures de temps [46]. Pour des fours de 150 kg, le temps de calcination additionné au temps de refroidissement donnait 24 heures. Il avait été démontré que les particules de petites dimensions étaient meilleures en terme de défluoruration. Cependant, les conditions expérimentales n'encourageaient pas leur utilisation du fait que les filtres se colmataient facilement.

D'après une étude récente [46], la défluoruration à travers des colonnes (fig. 26) serait meilleure que celle effectuée à travers les récipients (fig. 23 et 27). En effet, au niveau des colonnes, les eaux circulent de bas en haut pour éviter le débordement en cas d'obstruction du filtre ; ce qui permet une répartition uniforme de l'écoulement. Avec les récipients, l'écoulement se fait vers le bas. Bien que ces derniers soient moins coûteux, ils ne sont pas recommandés à cause de leur faible capacité de défluoruration. D'après la même étude, des colonnes de 15 cm de diamètre et de 50 cm de hauteur avec une capacité de 4 kg de noir animal pouvaient être considérées comme standards. La hauteur de 50 cm était choisie afin de permettre de recueillir l'eau à partir d'un récipient disposé dans les tables familiales normales ayant une hauteur de 70 à 90 cm évitant ainsi les coûts supplémentaires de plateformes spéciales de traitement. Le filtre avait la capacité de produire de l'eau avec une concentration résiduelle inférieure à 0,1 mg/l pour une teneur en fluorures initiale de 12 mg/l.

3. Défluoruration par l'alumine activée

Ce procédé a aussi été utilisé dans le cadre de la défluoruration notamment en Inde où différentes études ont été menées à cet effet.

Par exemple, dans le sud de l'Inde, des échantillons d'une teneur en fluorures de 3mg/l et d'une alcalinité de 432 mg/l avaient été testés avec des particules d'alumine de plusieurs dimensions [28]. Les particules comprises entre 150 et 300 microns avaient été retenues comme meilleures en terme d'efficacité et de coût. Les dimensions optimales du tube en acier inoxydable étaient de 5 cm de rayon et 25 cm de hauteur pour un lit de 2 kg d'alumine activée. La meilleure régénération était obtenue avec 2% d'acide chlorhydrique et une capacité de régénération de $(2,2 \text{ m}) \times (10 \text{ m}^2) (\text{m}^3)$ d'alumine/ kg HCl. L'eau traitée avait une teneur avoisinant 0,8 mg/l avec un pH compris entre 7,7 et 8. Le matériau devait être renouvelé chaque 3 mois. Pour des raisons de commodité, le tube était incorporé à des filtres déjà vendus dans le pays. La capacité du réservoir était de 12 litres, celle du tube de 2 litres et l'eau traitée pouvait atteindre un volume de 13 litres d'eau. La capacité de défluoruration du matériel était de 140 mg F/kg.

En 1992, une firme commerciale de la place s'était chargée de la vulgarisation et de la commercialisation de défluorurateurs, de même que du service régulier de régénération. C'est ainsi qu'il avait été vendu, 25 dispositifs communautaires destinés à une population de 200-400 hbts à un prix de 431 900 FCFA. De même que 500 défluorurateurs domestiques étaient vendus à un prix variant entre 16000 FCFA et 21000 FCFA dépendamment du volume du contenant et du système de filtre.

Nous voyons ainsi des méthodes simples qui ont permis aux populations rurales notamment dans les régions de l'Inde et de la Tanzanie de pouvoir disposer d'une eau de qualité satisfaisante. Cependant, il existe d'autres produits non encore appliqués sur le terrain mais qui sont testés en vue d'une future utilisation. Il s'agit surtout des matériaux naturels qui, de par leur disponibilité et leur faible coût attirent les chercheurs. Nous pouvons citer :

- Les minéraux naturels

De nombreuses expériences ont été menées avec les minéraux naturels dans des pays comme l'Inde ou encore l'Afrique du Sud. Plusieurs études ont porté sur la capacité d'adsorption des sols et des minerais ainsi que sur leur usage potentiel pour la défluoruration. Cette capacité a été étudiée dans un premier temps, par certains chercheurs [34]. Les résultats avaient montré que les fluorures contenus dans l'eau pouvaient être enlevés à des degrés variables par adsorption sur divers types de sols et de minéraux en particulier [34]. Après cette étude, plusieurs autres ont été menées : sols illinois aux Etats-Unis, sols sodiques en Inde, alumine activée, poterie à base d'argile, andosols au Kenya, cendres volantes, kaolinite, et sols d'illite et de goethite en Chine.

Des essais effectués en Inde avaient utilisés le sable rouge, le charbon naturel, les cendres volantes, la serpentine avec une eau synthétique de teneur en fluorures 10 mg/l [33]. Les observations avaient montré qu'après une période de 30 mn, la capacité de défluoruration des ions fluorures était réduite ce qui faisait que la concentration en fluorures chutait. Ceci était dû probablement à une saturation des sites d'échange à la surface des matériaux [33]. Cette étude a révélé que parmi les cinq matériaux utilisés pour la défluoruration, le sable rouge donnait la meilleure capacité de défluoruration suivi des briques, de la serpentine, de la cendre volante puis du charbon (Annexe 2.4).

Par ailleurs, des études de reconnaissance ont été effectuées en Afrique du Sud afin de connaître la capacité de certains minéraux existants dans la région [34]. La capacité d'adsorption des différents échantillons était déterminée pour différentes valeurs et des concentrations en fluorures initiales de 10 mgF/l. L'adsorption maximale était réalisée à pH 5 par des adsorbants comme les oxydes d'aluminium et à pH égal à 3 pour les oxydes de fer comme les goethites. Il avait été conclu cependant que les capacités des différents matériaux étaient faibles.

- Les plantes

Des tests effectués en Inde sur les racines de *Moringa oleifera* et de *Vetiveria zizanoides* ont montré qu'elles avaient une capacité de défluoruration remarquable aussi élevée que celle de l'alumine activée [42]. L'inconvénient était que le traitement nécessitait une grande quantité

de racines. Ces méthodes sont actuellement utilisées comme méthode d'épuration des eaux mais pas pour le traitement spécifique du fluor. Cependant, pour effectuer des expériences de défluoruration, la procédure devrait être la même. A titre indicatif, nous pouvons citer quelques essais qui ont été utilisés dans le cadre de l'épuration des eaux [42] :

- dispositif de traitement, à l'échelle pilote dans la ville de THYOLO au sud du Malawi : dans des colonnes remplies de gravier (floculateurs à lit de gravier), 18 minutes sont allouées pour la floculation et la sédimentation. Les colonnes sont suivies d'un décanteur puis un filtre à gravité ;
- Epuration des eaux de bassins de lagunage ;
- Epuration des rejets de canne à sucre ;

2.3.3. Recharge de nappes souterraines

Des projets de recharge des nappes souterraines ont été testés dans certaines régions de l'Inde [35]. Ceux-ci consistent en des aménagements hydrologiques visant à assurer une meilleure distribution de l'eau des bassins de recharge aux sources souterraines. C'est le cas dans la région de Gujarat où le gouvernement avait identifié des projets à moyen terme dans ces régions dans l'optique de résoudre le problème de la rareté de l'eau mais aussi des forts taux de fluorures dans l'eau de consommation. Le processus suivi était de développer dans une première étape des réservoirs artificiels pour stocker l'eau de pluie. Des puits de percolation étaient alors implantés pour la recharge des nappes phréatiques. De ce fait, comme les puits de percolation interceptaient une large surface de formation perméable, de grands débits pouvaient être véhiculés. L'exemple d'un puits de percolation construit dans le soubassement d'un complexe de vente à Ahmedabad en 1994 confirmait cette hypothèse. Le problème résidait cependant dans les pertes importantes causées par les évaporations au niveau du bassin de rétention. Des projets pilotes ont été ainsi effectués. Nous pouvons citer en exemple le projet de Meshana (Inde) réalisé pour une population de 12.000 personnes et 3.000 têtes de bétails (1500). Le coût d'un puits de percolation était estimé à 2.468.000 FCFA [35].



Figure 21 : Utilisation d'un dispositif utilisant une pompe manuelle

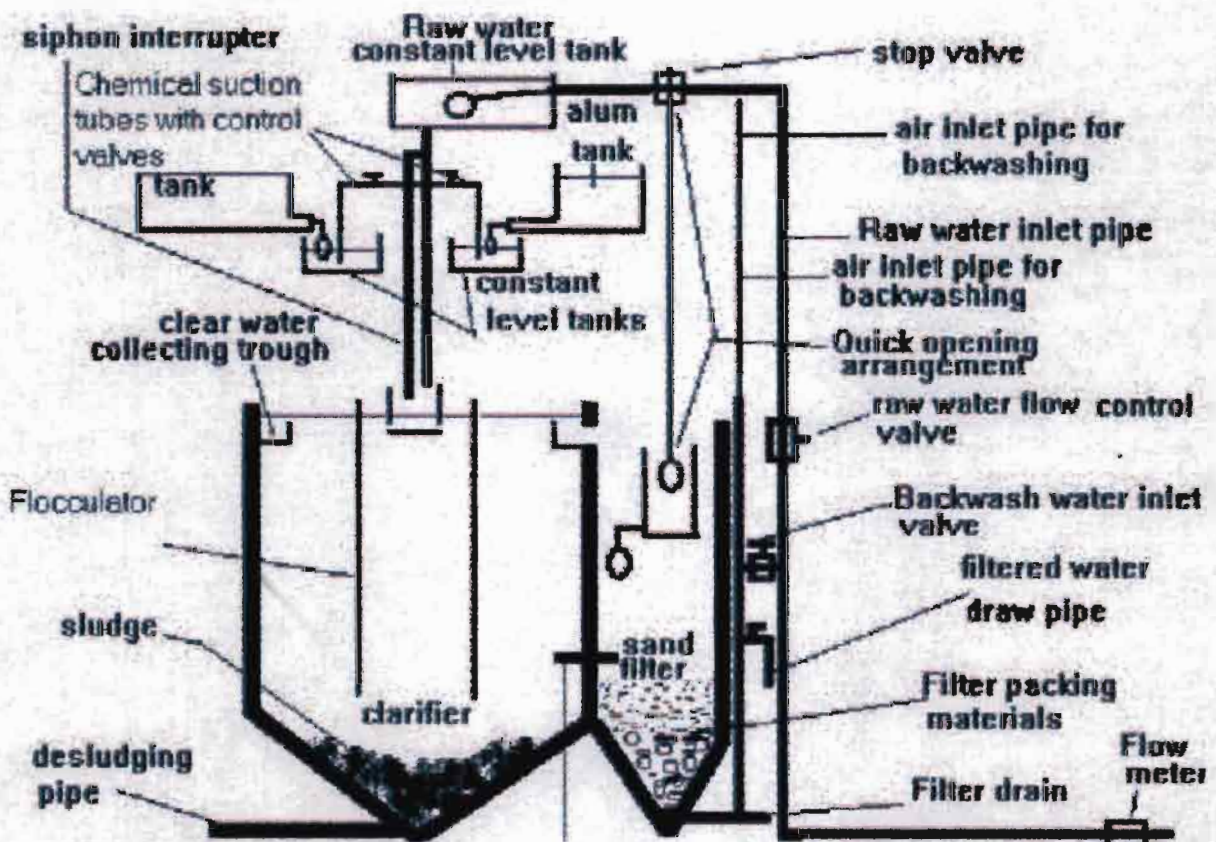


Figure 22 : Dispositif de défluoruration utilisant la technique de Nalgonda

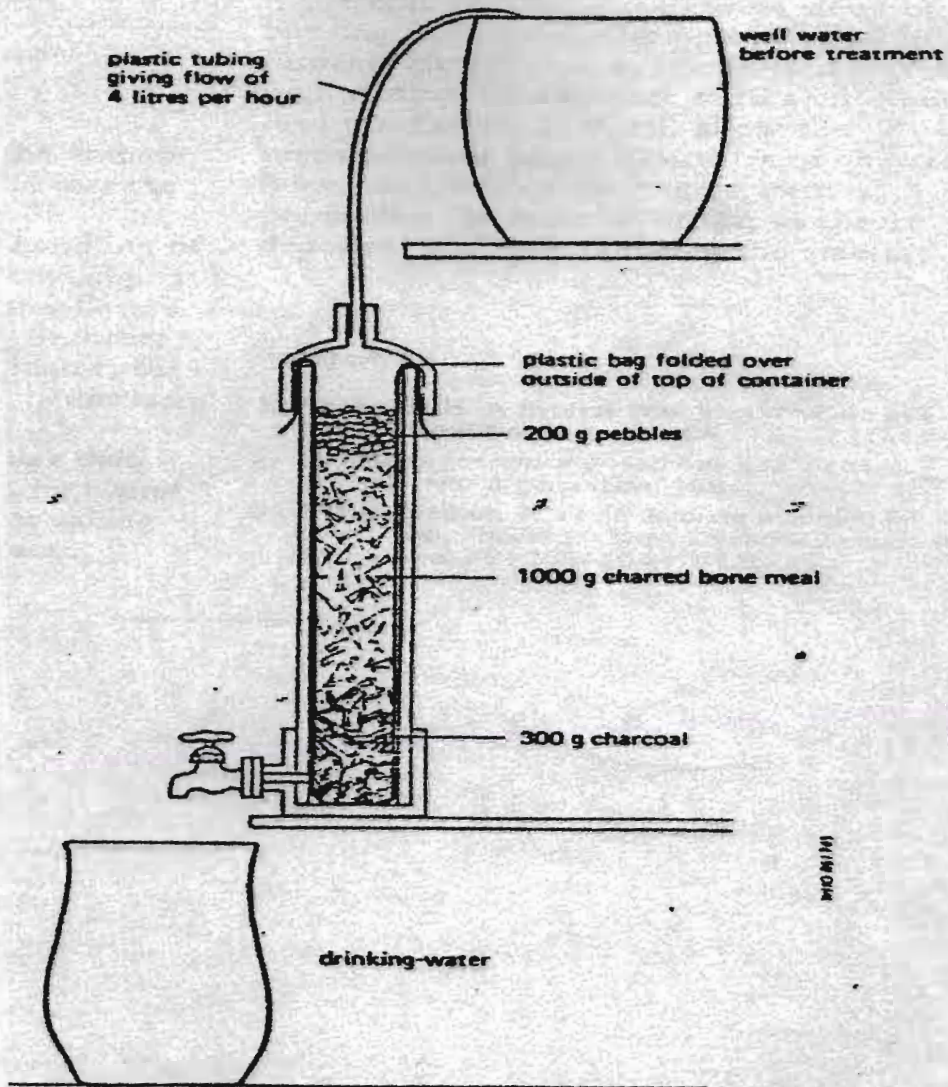


Figure 23 : Dispositif de défluoruration domestique utilisant le noir animal



Figure 24 : Fours utilisés pour la fabrication du noir animal

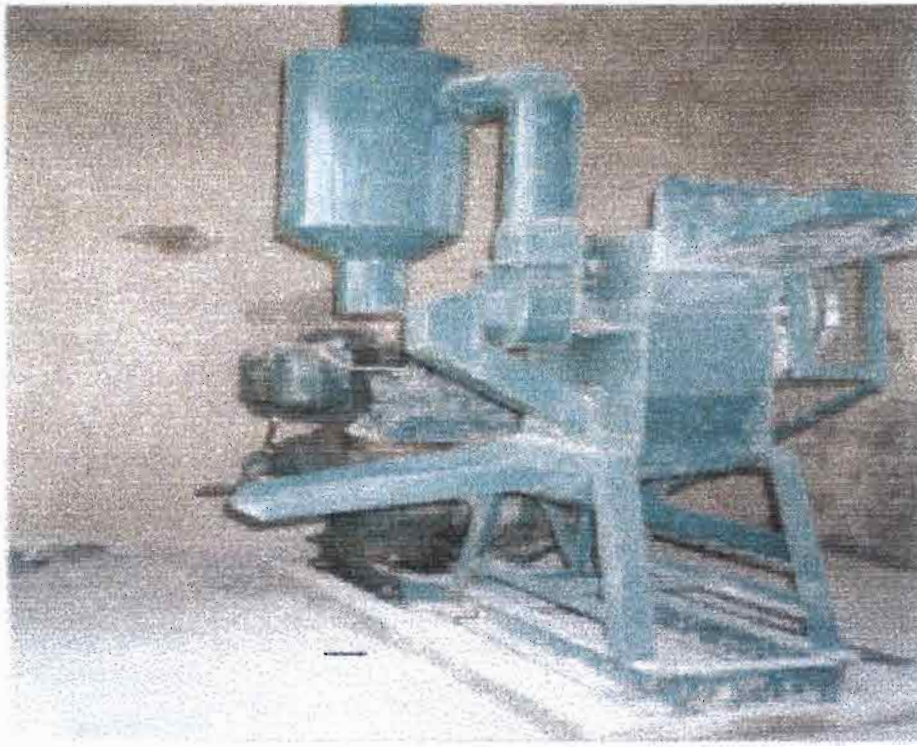


Figure 25 : Appareils de broyage des os calcinés

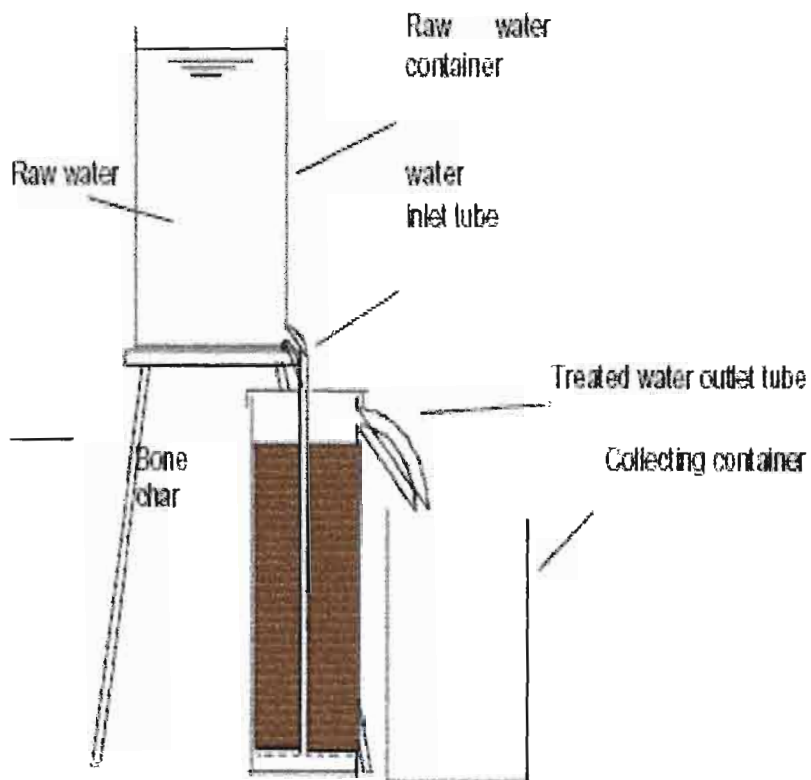


Figure 26 : Défluoruration à travers une colonne contenant du noir animal

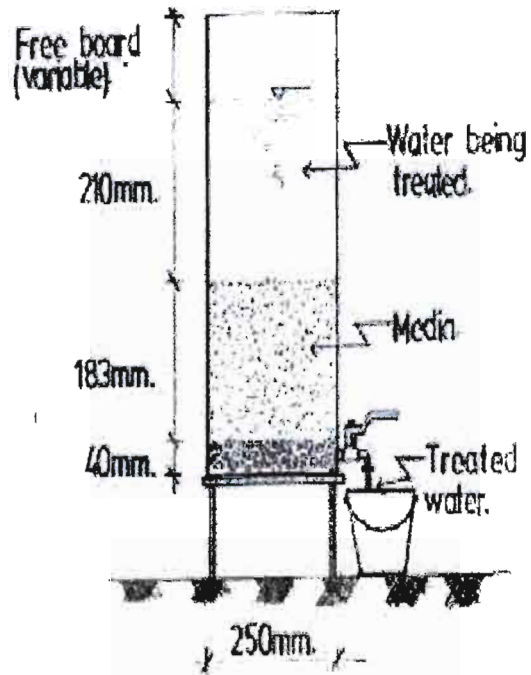


Figure 27 : Dispositif domestique utilisant le charbon d'os

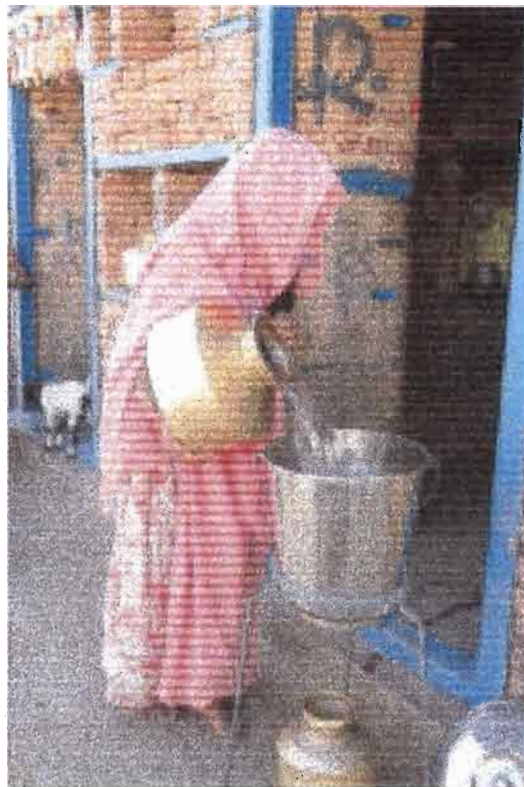


Figure 28 : Type de défluorurateur domestique



Figure 29 : Différentes types de conception des défluorurateurs domestiques

2.4. EXPERIENCES MENEES AU SENEGAL

Depuis plusieurs années, des recherches ont été effectuées au Sénégal pour trouver des solutions à la présence d'un excès de fluorures dans les eaux de certaines régions du pays. Cependant, ces démarches effectuées par la S.O.N.E.E.S. en collaboration avec des structures comme le département de Géologie de la faculté des sciences de l'U.C.A.D., l'E.S.P., l'E.P.T., le Bureau d'Etudes I.G.I.P., se sont limitées uniquement à des essais de laboratoire et des essais pilotes. Les résultats parfois satisfaisants ont été jugés trop coûteux. Actuellement, le seul traitement utilisé par la S.D.E consiste à mélanger les eaux fluorées à des sources d'eau non fluorées ; ce qui n'empêche que le taux de fluorures dans ces eaux bien que toléré reste bien en dessus des normes (2 à 3 mg/l). Plusieurs expériences ont été observées.

En 1982, une station pilote avait été installée par le bureau I.G.I.P. [24] à Bambey pour traiter l'eau du forage n°1 avec comme principal réactif le phosphate d'alumine prélevé à Lam-Lam. Cependant, la technique n'a pas permis de réduire la teneur en fluorures de manière appréciable. Il a même été observé quelque fois, une augmentation de la teneur en fluorures. Par ailleurs, l'eau traitée s'était enrichie en certains éléments tels que l'arsenic, le cadmium, les chlorures, les sulfates bien que ces éléments restaient dans les limites admissibles. Selon I.G.I.P., cela était dû à la variation de la structure du phosphate à l'intérieur du gisement. En effet, le phosphate fourni avait une granulométrie 0-3, 0-125, 3-15 avec une teneur 6% $AlPO_4$ contenant toujours une grosse quantité de poussière. Il fallait d'autre part faire des prélèvements sélectifs à plusieurs endroits, puis tamiser et laver le produit, ensuite étudier la structure et la constitution chimique du minéral. Ce qui augmentait les coûts du procédé. Les coûts en réactif estimés par m^3 d'eau défluorée variaient alors entre 157 et 215 FCFA de Bambey à Kaolack. Cependant, d'après I.G.I.P., la capacité d'adsorption pouvait être améliorée de 10 à 20% en utilisant du phosphate d'alumine débarrassé des particules d'une granulométrie de 0,8 à 1,2 mm.

De 1983 à 1984, des études d'orientation avaient été entreprises par la S.O.N.E.E.S. en collaboration avec l'ENSUT (M. KIRSHE) et la faculté des sciences (TRAVI) [24]. Une analyse complète des eaux de 2 forages de Kaolack et celui de Fatick ont montré que ces eaux étaient saturées en fluoro-apatite ; ce qui fait que les méthodes de précipitation par le calcium n'étaient pas envisageables. Des essais sur l'eau de Fatick dont la teneur initiale en fluorures était de 6,8 mg/l, sont tentés avec divers produits tel que l'attapulgit (trouvé localement

d'après TRAVI), le talc, les aluns de fer, de potassium et d'ammonium, la magnésie (Annexe 2.2). La magnésie s'est révélée la plus intéressante en faisant baisser la concentration en F^- de 6,8 g/l à 0,6 g/l, les aluns de potassium et d'ammonium permettent d'atteindre 1,2 mg/l. Mais pour des inconvénients d'ordre organoleptique et d'augmentation du pH de l'eau, la magnésie n'a pas été retenue pour la poursuite des expériences.

En Janvier 1985, une convention de recherche entre l'ENSUT et la S.O.N.E.E.S. sur la défluoruration des eaux de boisson a permis à l'ENSUT de tester plusieurs produits sur 200 ml de l'eau de Fatick (charbon actif, carbonate de calcium, nitrate de Ca, chaux, magnésie, attapulгите, talc, oxyde d'aluminium, alun de potassium) [24] (Annexe 2.2). Seuls le sulfate d'aluminium et les aluns d'ammonium et de potassium ont donné des résultats intéressants :

- 1 g/l de sulfate d'alumine donne un résiduel de 0,9 mg/l F^- /l mais avec un pH final de 5,9 ;
- 1 g/l d'alun d'ammonium et d'alun de potassium donne respectivement 2,6 et 2,9 mg F^- /l pour une teneur initiale de 6,8 mg F^- /l, le pH final étant de 6,6.

En Novembre 1985, un avenant à cette convention a été établi pour une période de huit mois afin de définir les conditions optimales d'utilisation de l'alun de potassium ou du sulfate d'alumine. Il en est sorti qu'avec 0,75 g/l de sulfate d'alumine, les fluorures de l'eau pouvaient passer d'environ 6,8 à 1 mg/l et le pH passe de 8,2 à 6,25. Cependant, cette concentration était jugée assez importante. Le procédé se ramène à une précipitation par le sulfate d'alumine, suivie d'une décantation et une filtration sur sable (de tous les matériaux filtrants utilisés, c'est le sable qui a donné les meilleurs résultats. Du point de vue qualité finale de l'eau, les teneurs en sulfates et en aluminium augmentent considérablement (de 42 à 320 mg/l pour les sulfates 0,05 à 0,015 mg/l pour l'aluminium).

En 1986, un projet d'études a été effectué sur la défluoruration des eaux à l'Ecole Polytechnique de Thiès [14]. L'eau brute provenait d'un puits de Mont Rolland avec une teneur en fluor de 6 mg/l. Les produits utilisés étaient : l'alun de potasse, le sulfate d'alumine, l'alumine activée et la poudre d'os. D'après les résultats (Annexe 2), 3,2 g/l d'alun de potasse permettaient de défluorurer une eau contenant 6,2 ppm de fluor. 0,9 g de sulfate d'aluminium combiné à 500 mg/l de chaux, permettent de ramener la teneur en fluorures au niveau admissible. Avec l'alumine activée, les résultats obtenus étaient assez satisfaisants. Avec l'eau contenant 6,2 ppm F^- , sa capacité de défluoruration était de 0,53 g F^- /kg d'alumine. La

poudre d'os donnait des résultats acceptables bien que sa capacité était plus faible. Pour résoudre le problème d'odeur et de couleur, il avait été effectué une préchloration de l'eau brute, à une adsorption sur charbon de bois et à un rinçage du matériau avec de la soude à 1%. Il a été alors proposé l'utilisation de l'alumine activée pour la défluoruration des eaux dans les centres urbains et la poudre d'os comme matériau filtrant dans les unités individuelles de défluoruration en milieu rural.

Une deuxième convention S.O.N.E.E.S. – E.N.S.U.T. a été établie en Décembre 1987 pour une période de six mois. Le travail a été confié à un étudiant comme sujet de mémoire de fin d'études [22]. Les analyses physico-chimiques des diverses eaux n'ont pas révélé de différences notables quant à leur composition. Et puis, des essais comparatifs de défluoruration entre le sulfate d'alumine et le polychlorosulfate d'aluminium ont été réalisés et ont abouti à la conclusion que pour la même quantité de produit utilisée, le pouvoir défluorurant du sulfate d'alumine technique est supérieur de 50 à 60% à celui du polychlorosulfate d'alumine [20]. Le sulfate d'alumine augmente considérablement la teneur en sulfates de l'eau traitée, par exemple pour le forage n°1 de Fatick, cette teneur passe de 94,6 mg/l pour l'eau brute à 389,8 mg/l pour l'eau traitée. Le polychlorosulfate d'alumine augmente la valeur des chlorures : 531,4 mg/l à 652 mg/l pour le forage n°1 de Fatick. Le choix pour cette étude s'est pourtant porté sur le polychlorosulfate d'aluminium qui donne de l'eau limpide après décantation alors qu'avec le sulfate d'alumine, il fallait effectuer une filtration.

Une étude très récente [8] a été effectuée sur l'utilisation de la nanofiltration et de l'ultrafiltration pour la rétention des fluorures contenues dans les eaux de boisson consommée en France et au Sénégal. D'après cette étude, la nanofiltration apparaît « l'unique procédé qui permet à la fois un abattement suffisant en ions fluorures et également une déminéralisation partielle des eaux à caractère saumâtre ». Il a été par ailleurs proposé parmi les membranes de « Dow » (membranes de nanofiltration commercialisées par la société *Dow Chemical*), la NF270 pour le traitement d'une eau de France contenant 3,76 ppm et la NF90 pour une eau du Sénégal hyperfluorée et salée.

2.5. CONCLUSION

La multitude de procédés témoigne de l'importance accordée à ce phénomène. Certaines de ces méthodes paraissent à priori simples d'utilisation et adaptées au milieu rural. Il reste à tester l'applicabilité des différentes méthodes.

Troisième partie

PROPOSITIONS DE SOLUTIONS - PERSPECTIVES

3.1. INTRODUCTION

Le chapitre précédent nous a permis de passer en revue plusieurs méthodes de traitement à notre connaissance. Nous avons remarqué que la plupart des matériaux ont un intérêt purement académique et n'ont pas été beaucoup utilisés pour la défluoruration. Par ailleurs, chacune des méthodes appliquées sur le terrain présente aussi bien des avantages que des inconvénients dépendamment de la capacité de défluoruration, du coût mais aussi de la technologie utilisée. Il convient de voir ainsi l'applicabilité de ces méthodes au Sénégal.

3.2. ANALYSE DE LA SITUATION AU SENEGAL

La principale remarque à effectuer est que les solutions techniquement acceptables ne manquent pas. Il est à se demander pourquoi ces solutions ne sont pas encore exploitées au Sénégal. En effet, depuis les années 80 des recherches sont menées dans ce sens. Les raisons peuvent être liées à divers phénomènes. D'une part, le problème des fluorures est mal connu au niveau des populations concernées : pour les uns, le phénomène relève de l'action néfaste de certaines personnes dotées d'un pouvoir maléfique ; pour d'autres, les maladies sont dues à l'influence de certains génies [13] (« Djinnés »). Une étape nécessaire est donc la prise de conscience par rapport à ce fléau. Même si celle-ci commence à s'opérer, il reste à en définir l'impact réel et son importance dans l'ordre des priorités. D'autre part, les études effectuées dans les différentes structures ne semblent pas s'inscrire dans le cadre d'un seul projet clairement élaboré.

Les projets de fin d'études et mémoires effectués dans les écoles ne suffisent pas pour une mise en œuvre pratique s'il n'existe pas en aval, une structure chargée d'assurer la coordination. Pour cela, il faut nécessairement adopter une stratégie qui équivaut à la formation d'équipes pluridisciplinaires formées de professionnels à tous les niveaux (génie civil, génie chimique, génie mécanique etc.). Et ceci aussi bien sur le plan de la recherche mais aussi sur la mise en œuvre pratique des résultats de recherche. Cela passe bien entendu par une volonté politique réelle de résolution de problème.

A vrai dire, il est difficile de porter un choix catégorique sur telle ou telle méthode. Sans considération économique, il ne fait aucun doute qu'il faut privilégier les méthodes donnant la meilleure qualité. Mais souvent un compromis qualité/prix est nécessaire tant que l'eau traitée

respecte les normes en vigueur. Une autre difficulté réside dans la définition des marges financières réelles qui peuvent être allouées pour la résolution de ce problème. Cela dépend de plusieurs facteurs notamment la répartition des budgets entre les différents secteurs d'activité et l'importance accordée à chaque secteur. Même si on sait que la santé n'a pas de prix, il n'en reste pas moins qu'elle a un coût. La meilleure méthode sera celle qui peut être soutenue par l'Etat ou par les organisations humanitaires.

Les solutions naturelles basées sur la recharge des eaux souterraines ou sur la dilution des eaux fluorées par d'autres sources moins chargées semblent être les plus durables et les plus sûres. En effet, les caractéristiques de l'eau ne sont pas modifiées. De plus, elles permettent de disposer d'une grande quantité d'eau. Cependant, l'implantation de ces genres d'installation induit une modification littérale du milieu souterrain aussi bien sur le plan hydrogéologique que sur le plan hydrochimique. De ce fait, ces études demandent une attention très particulière et ne peuvent s'effectuer que dans le long terme. Par ailleurs, dans nos pays, même quand il s'agit de vastes programmes d'aménagement, les études ne sont pas très approfondies. Ce qui fait que tous les paramètres ne sont pas pris en compte. Cela entraîne au bout du compte des problèmes environnementaux énormes ainsi que de nombreuses épidémies d'ordre hydrique.

Pour illustrer ce phénomène, il suffit de rappeler la consommation d'eaux trop riches en Arsenic au Bangladesh et en Inde due à l'implantation de milliers de tubes forés en contact direct avec les nappes phréatiques [15]. Pour l'épidémiologiste Allan Smith, « l'ampleur de ce désastre écologique dépasse tout ce que l'on a connu ». Au Bangladesh Occidental, des milliers de puits tubés avaient été creusés dans les nappes phréatiques du delta du Gange, du Brahmapoutre et de la Meghna pour soutenir la culture des nouvelles variétés de riz, plus exigeantes en eau. Au Bangladesh, c'est dans un souci de santé publique que les grandes agences d'aide internationale (Unicef, Banque mondiale, Programme des Nations unies etc.) ont engagé dans les années soixante-dix un vaste programme d'assainissement de l'eau. Par ce programme, le but visé était de fournir à la population une eau propre et réduire la mortalité due aux maladies diarrhéiques. Là encore, des dizaines de milliers de tubes sont forés dans ce même delta. Au seul Bangladesh, 12000 malades officiellement recensés présentent les symptômes d'un empoisonnement chronique. Les premiers puits ayant été creusés il y a une trentaine d'années, les experts s'attendent en outre à une multiplication des cas de cancers dans les prochaines années. Nombre d'experts partagent l'opinion selon

laquelle, l'arsenic serait retenu (ou adsorbé) à la surface des oxydes et des hydroxydes de fer présents dans les sédiments. Ce serait alors la réduction ou la dissolution de ces minéraux, elle-même induite par un apport de carbone organique, qui entraînerait sa libération dans l'eau des nappes phréatiques [15].

On mesure ainsi la complexité de manière générale de ces projets d'envergure où l'objectif principal est de maîtriser l'approvisionnement en eau. Ils sont aussi difficiles à mettre en œuvre qu'à contrôler. Ces types de projets ne devraient donc pas être privilégiés de manière systématique dans les pays en développement. Ils devront encore être à l'étude durant les prochaines années en vue d'une application réfléchie et contrôlée.

Par ailleurs, la possibilité d'un mélange des sources d'eaux hyperfluorées aux sources de concentration en fluorures moindre se heurte au problème de disponibilité de ces sources de remplacement. En effet, étant donné la continuité des nappes, les régions voisines possèdent en général des eaux de mêmes caractéristiques chimiques. Il est quand même vrai que quelques poches d'eau faiblement chargées peuvent exister mais la quantité disponible est faible et ne permet pas d'assurer l'alimentation en eau de toutes les localités. C'est pourquoi, cette méthode pourtant adoptée par la S.D.E. dans les régions de Kaolack, Fatick et Diourbel n'a pas donné les résultats escomptés. Les analyses chimiques mensuelles effectuées dans les laboratoires de la société montrent d'ailleurs que ces eaux restent toujours aussi fluorées ; les concentrations dépassent la norme de 0,8 mg/l pour le Sénégal et restent supérieures à 2 mg/l. La conséquence en est que les populations de ces localités, pourtant raccordées au réseau d'alimentation se déplacent pour aller puiser individuellement au niveau des puits dispersés partout dans ces régions. En effet, le goût caractéristique du fluor combiné à l'effet de la minéralisation de l'eau a une répercussion sur le goût de l'eau qui est ainsi fortement prononcé. D'autre part, l'expérience aidant, les populations sont parvenues à distinguer les eaux à goût prononcé des eaux qui le sont moins ; à telle point qu'une étude statistique de la répartition des sources d'eau fluorées pourraient être menée avec succès par le seul biais de l'information orale.

Nous voyons ainsi comment l'application de ces méthodes qui semblent être les meilleures du point de vue de la quantité et de la qualité de l'eau mise à la disposition des populations (l'eau reste à l'état naturel et ne subit pas de modifications chimiques), demeure hypothétique. Il ne reste donc que la possibilité de la défluoruration des eaux.

3.3. CHOIX DE TECHNIQUES DE DEFLUORURATION

En passant en revue les méthodes de défluoruration appliquées à travers le monde, on remarque que les procédés chimiques ont été préférés de beaucoup aux techniques membranaires. En effet, dans les pays où la majorité de la population affectée vivent en zone rurale, l'installation à grande échelle pose le problème de l'élaboration d'un réseau d'approvisionnement en eau, dans un cadre où les communautés sont aussi dispersées qu'éloignées les unes des autres.

Les procédés membranaires de défluoruration des eaux de boisson apparaissent, dans une certaine mesure plus efficaces que les procédés chimiques classiques, surtout quand ces derniers permettent de résoudre le problème de la minéralisation excessive des eaux. Cependant, seules les applications à moyenne et à grande échelle sont concernées. Et même dans ce cas, les installations nécessitent des investissements très élevés, une main d'œuvre qualifiée mais aussi un renouvellement fréquent des membranes dont le coût est déjà assez cher (20% du prix des installations)[5]. Tous ces facteurs constituent ainsi une limitation importante au développement des techniques à membrane. Leur utilisation résultera donc d'un abaissement soit du coût des membranes, soit de la consommation énergétique. Par ailleurs, les études en cours pourraient aboutir à une amélioration de la performance des membranes ; ce qui permettrait leur utilisation éventuelle pour les besoins de la défluoruration.

En ce qui concerne les méthodes chimiques, la difficulté principale réside dans le fait qu'on ne peut pas prédire le comportement de toutes les espèces chimiques en solution. C'est seulement par le biais d'essais de laboratoire qu'on arrive à avoir une notion assez précise de la procédure et de la quantité de matériau nécessaire pour obtenir une défluoruration optimale tout en respectant les limites de potabilité. Pour le moment, ce sont ces méthodes qui semblent être le plus à notre portée. De ce fait, les techniques proposées dans le cadre de ce rapport seront essentiellement chimiques. A long terme, ces dernières pourront faire l'objet d'étude pour une utilisation à grande échelle, au même titre d'ailleurs que les procédés membranaires. Cependant, pour des solutions à court terme, vu l'urgence du problème et la répartition dispersée de la population, il nous paraît plus raisonnable d'opter pour la solution de la défluoruration à l'échelle domestique.

3.4. CHOIX DE MATERIAUX POUR LA DEFLUORURATION

Les matériaux diffèrent par la qualité de la défluoruration et leur disponibilité. En ce qui concerne la disponibilité des matériaux, une distinction peut être faite entre les matériaux à faible coût qui sont constitués de produits naturels en quantité inestimable et les matériaux à moindre coût ou à coût élevé. L'examen de ces matériaux s'impose.

Les minerais

Au Sénégal, on retrouve certains minerais dans le bassin sédimentaire du socle ancien : phosphates de Taïba, Thiès et Matam, attapulgite et matériaux de construction sur le plateau de Thiès etc. En Guinée, pays voisin, on retrouve la bauxite qui est citée comme le meilleur minéral en matière de défluoruration [34].

Les os de bétails

Vu le nombre innombrable de têtes qui sont élevés aussi bien au Sénégal que dans les pays voisins, il est évident que l'exploitation d'une telle ressource ne devrait pas poser de problèmes.

Les plantes

Au Sénégal, *Moringa Olifera* connu sous le nom de « Nébédai » ou encore le *Vetiveria zizanoïdes* appelé « sep » ou « thiep » en Wolof constituent des sources de défluoruration viables du fait de leur disponibilité.

Les produits de consommation

Les produits de consommation quant à eux (résidus de café et de thé, noix de coco, etc.) sont disponibles dans le marché. Cependant, l'usage en grandes quantités pourrait poser un certain nombre de problèmes.

Certains produits de grand intérêt tels que le sulfate d'aluminium, le polychlorosulfate d'aluminium ou encore l'aluminium sont le fruit d'importation. Leur prix est assez élevé. Cependant, les essais effectués au Sénégal ont montré que les matériaux ayant les meilleures capacités de défluoruration étaient : l'alumine activée, la poudre d'os ainsi que les sels

d'aluminium. Ce n'est donc pas le fait du hasard que ces mêmes méthodes aient été les plus utilisées à travers le monde.

D'autre part, à l'exception des os de bétail, l'utilisation de matériaux locaux tels que les minerais, les plantes ainsi que les produits de consommation nécessitent une grande quantité de matières. De plus, ils s'épuisent rapidement.

Une défluoruration domestique serait préférable par l'un des trois matériaux suivants :

Le noir animal

Ce produit peut être retenu comme étant la meilleure méthode de défluoruration au cas où il ne se poserait pas un problème d'acceptation de la méthode. La technique est simple car tout le traitement peut s'effectuer sur un seul seau, ce qui facilite la mise en œuvre ; de plus c'est la méthode la moins chère. Il n'y a pas de restriction particulière contrairement à l'usage du sulfate d'aluminium ou de l'alumine activée qui peuvent être à l'origine de l'excès dans l'eau de matières tels que les sulfates.

Le sel d'aluminium

A défaut du noir animal, l'utilisation du sulfate d'aluminium ou du polychlorosulfate d'alumine en combinaison de chaux pourrait être envisagée. Cependant, il faudra tenir compte des taux de sulfate mais aussi des restrictions évoquées plus haut (cf. p. 42) concernant notamment sur les résidus secs et sur la dureté de l'eau.

L'alumine activée

L'utilisation de l'alumine activée n'est pas à exclure. En effet, bien que le produit coûte cher, le fait que le dispositif peut être utilisé à petite échelle le rend plus attrayant. Il n'existe pas à notre connaissance, de restriction concernant l'usage de ce produit. Seulement, le filtre est fréquemment renouvelé.

Bien que plusieurs essais aient été effectués pour ces différents matériaux, les études datent de longtemps et les caractéristiques des eaux changent suivant les années. D'autre part, les essais étaient effectués sur un seul type d'eau alors que suivant les régions, le profil chimique des eaux change. Des essais complémentaires seront donc nécessaires afin de connaître les quantités de réactifs à utiliser ; ce qui permet dans le cas de l'alumine activée et de la poudre

d'os, de connaître les dimensions de la colonne et des couches intermédiaires pour la répartition de l'eau et la désinfection. Pour le sulfate d'aluminium, il s'agira de déterminer de manière précise les temps de mise en œuvre des processus de coagulation – floculation (temps d'agitation rapide et lente) en fonction des types d'eau.

3.5. CONCLUSION

Cet exposé a permis de faire le choix d'un certain nombre de matériaux pour la défluoruration. Cependant, cette sélection ne saurait être catégorique. En effet, dans ce genre d'études, il existe toujours une certaine part de subjectivité qui fait qu'un certain recul doit être observé ; surtout lorsque les décisions à prendre ont un impact direct sur les populations concernées. C'est une donnée importante à prendre en considération en fonction des méthodes et des coutumes et tradition des populations. En tout état de cause, les solutions à préconiser doivent être les plus pratiques et les plus simples possibles et adaptées au contexte du pays.

CONCLUSION

Cette étude avait un double objectif : faire la bibliographie la plus exhaustive possible des méthodes de traitement du fluor qui existent en vue de la réduction de la teneur en fluorures dans les eaux ; mais aussi de proposer des solutions adaptées au contexte économique du Sénégal. A cet effet, plusieurs méthodes notamment celles utilisées en Inde et en Tanzanie avaient été ciblées pour des pays en développement comme le Sénégal.

Ce travail a ainsi permis de donner un large éventail des possibilités de traitement qui existent, leurs avantages ainsi que leurs limites. En réalité, il n'existe pas de panacée qui obéisse à tous les critères combinés de coût, de qualité et de facilité de mise en oeuvre. Un compromis est toujours nécessaire pour effectuer un choix efficace. Pour le cas du Sénégal, notre choix se penche sur des méthodes basées sur le sulfate d'aluminium, l'alumine activée et la poudre d'os dans le cadre d'une défluoruration de type domestique. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires afin d'optimiser la mise au point de ces méthodes en vue de leur mise en œuvre sur le terrain.

Par ailleurs, une bonne structuration de la recherche est nécessaire pour que le problème puisse être résolu. Cela passe nécessairement par l'élaboration de politiques de planification et de gestion durable des ressources naturelles et l'adoption de mesures hardies en matière de prévision, d'évaluation et de suivi des impacts environnementaux des différentes politiques sectorielles. D'où la nécessité d'un suivi et d'une évaluation continue par l'implication de tous les acteurs au cours de la mise en œuvre.

Loin de nous de vouloir considérer dans tout son sens l'axiome de ROBARTS selon lequel « une eau qui ne convient pas à un besoin particulier revient à pas d'eau du tout », compte tenu de notre contexte. Cependant, avoir une eau remplissant toute norme de potabilité semble être une exigence minimale.

RECOMMANDATIONS

1. Elaborer un plan global d'action visant à la mise en œuvre des procédés de défluoruration en incluant toutes les structures de recherche ainsi que les populations concernées.
2. Optimiser les méthodes relevant de l'alumine activée, de la poudre d'os et du sulfate d'aluminium selon les différents types d'eau qui existent dans les régions affectées.
3. Concevoir des défluorurateurs dans le cadre d'une utilisation domestique mais aussi de dispositifs à petite et moyenne échelle ou directement intégrées au niveau des forages.
4. Continuer la recherche en ce qui concerne les techniques membranaires pour une meilleure performance des membranes et une réduction des coûts.
5. Mener dans le long terme des études hydrologiques pour des projets éventuels de recharge des eaux souterraines.
6. Effectuer des essais sur les matériaux dont la capacité de défluoruration est jusqu'à présent peu connue (plantes, minéraux) afin d'enrichir la banque de donnée existante.

LEXIQUE

LEXIQUE

TERMES CHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES

Alcalin : 1. métal de la première colonne de la classification périodique, qui décompose l'eau à froid en produisant un hydroxyde (base forte). 2. qui contient une base ou qui en a les propriétés.

Bicarbonatée : qui contient un bicarbonate.

Bicarbonate : carbonate acide d'un métal alcalin.

Carbonate : minéral caractérisé par l'ion $(\text{CO}_3)^{2-}$, dont les principales variétés sont l'aragonite, la calcite et la dolomite.

Calcique : qui contient du calcium.

Complexe : composé formé d'un ou plusieurs atomes

Cristallin : constitué de cristaux visibles à l'œil nu et formé en profondeur à partir d'un magma (roche plutonique) ou par recristallisation à l'état solide.

Cristallochimique : relatif aux propriétés chimiques des cristaux

Co-précipitation : passage à l'état solide du ou de l'un des solutés d'une solution

Floculant : produit qui provoque la floculation

Floculation : précipitation en flocons, réversible, des suspensions colloïdales par agrégation des particules constituantes.

Halogène : se dit des éléments qui figurent dans la colonne VII.A du tableau périodique.

Halogénures : combinaison chimique contenant un halogène.

Hydroxyde : base renfermant au moins un groupement OH^- .

Isoélectrique : se dit d'un corps électriquement neutre.

Isomorphe : de même forme

Oxyde : composé résultant de la combinaison de l'oxygène avec une autre élément

Résine : substance organique de masse molaire élevée servant de point de départ à la fabrication d'une matière plastique.

Superphosphate : produit obtenu par traitement du phosphate tricalcique par l'acide sulfurique.

TERMES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Amphibole : Silicate de fer et de magnésium, noir, brun ou vert, constituant des roches magmatiques et métamorphiques.

Artésien : puits artésien : sondage ou forage qui donne une eau jaillissante.

Biotite : mica noir, parfois abondant dans certaines roches magmatiques et métamorphiques.

Calcite : minéral principal des roches calcaires.

Chlorite : sel de l'acide chloré.

Chrysolite : pierre fine d'un vert jaunâtre.

Crétacé : dernière période de l'ère secondaire (de -135 à -65 millions).

Cénozoïque : ère géologique correspondant aux systèmes tertiaires (paléogène et néogène).

Cristallisation : changement d'état d'un matériau conduisant à la formation de cristaux.

Dolomitique : qui contient de la dolomie.

Eocène : série du Cénozoïque (de -53 à -34 millions d'années).

Formations : ensemble de terrains de même nature.

Iridium : métal blanc grisâtre insoluble dans les acides

Magmatique : roche provenant de cristallisation en profondeur (roche plutonique) ou en surface (roche volcanique) d'un magma différencié.

Marnes : roche sédimentaire argileuse contenant une forte proportion (de 35 à 65% de calcaire).

Mésozoïque : ère géologique correspondant aux systèmes Trias, Jurassique et Crétacé (-245 à -65 millions d'années).

Muscovite : mica blanc, souvent présent dans les granites.

Néogène : système du cénozoïque précédant le quaternaire (-23,5 à -1,64 millions d'années).

Ordovicien : système du paléozoïque entre le cambrien et le silurien (-500 à -435 millions d'années).

Paléocène : série du Cénozoïque précédant l'éocène.

Paléozoïque : ère géologique correspondant aux systèmes allant du cambrien au permien (-540 à -245 millions d'années).

Platine : métal précieux blanc-gris.

Silicate : minéral formé à partir d'un motif élémentaire tétraédrique (SiO_4) comportant un atome de silicium au centre et des atomes d'oxygène au sommet.

Substratum : qui sert de base, d'infrastructure.

Topaze : silicate fluoré d'aluminium.

TERMES BIOLOGIQUES

Acroparesthésie : engourdissement des doigts et de la main et souvent douleurs paroxystiques.

Asthénie : affaiblissement général de l'organisme

Atrophie : diminution de volume d'une cellule, d'un tissu.

Ankylose disparition complète ou partielle des mouvements d'une articulation.

Cachexie : état d'affaiblissement et d'amaigrissement extrême.

Cyphose : Déviation de la colonne vertébrale à convexité postérieure douloureuse.

Dyspnée : difficulté à respirer.

Exostose : tumeur osseuse bénigne située à la surface d'un os.

Fibrillation : anomalie de l'activité musculaire caractérisée par de multiples contractions petites contractions isolées.

Hypoplasie : aplasie modérée d'un tissu, d'un organe.

Myélopathie : toute affection de la moelle épinière.

BIBLIOGRAPHIE

WEBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BADIANE M., DIOUF/NDIAYE M., SAWADOGO G., "Détermination de la dose optimale de fluor dans l'eau de boisson au Sénégal", *TSM*, N°6, 1995.
- [2] BARMES D., CHAPUT A., FRANCK R., HELD A. J., KEREBEL B., MONTEL G., VREVEN J., "Fluor, Denture et santé", *L'expansion scientifique*, p. 6-8.
- [3] BELUM V, FEJERSKOV O., MANJI F., MOLLER I. J. "*Dental fluorosis ; a hanbook for health workers*", munksgaard 1st edit., Copenhague 1988, pp. 88-99.
- [4] BENEFIELD L. D., JUDKINS J., WEAND B. L. "*Process Chemistry for water and wastewater treatment*", PRENTICE-HALL, Inc., *Englewood Cliffs*, New Jersey 1982, p.409.
- [5] CHRETIEN A., DOMANGE L., FAUCHERRE J., GELOSO M., HAISSINSKY M., PASCAL P., TRIBALAT S. « *Nouveau Traité de chimie minérale* », Tome XVI, *Masson et Cie, EDITEURS*, 1960, pp. 21-23.
- [6] COWI – POLYCONSULT « Caractéristiques hydrogéologiques du système aquifère du maastrichien au Sénégal », Rapport de synthèse, DGPRES, Min. Mines En. Hyd., Novembre 2001, pp. 2-3.
- [7] COWI – POLYCONSULT « Impact de la consommation d'eau contenant de fortes concentrations de fluorures, nitrates, chlorures, sulfates, magnésium sur la santé des populations – Situation dans les départements de Bambey, Mbacké, Fatick et Mbour », DGPRES, Min. Hyd., Juillet 2000, p. 15.
- [8] 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 et à des solutions de métaux lourds », Th. doct., Sénégal, UCAD, Fac. Sciences Tech., Janvier 2004, pp.9-15 ; pp.17-19 ; pp.38-39 ; pp.75-83.

[9] DIEYE A., DIOP C. M., RUMEAU M., « La défluoruration par les membranes ioniques », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, 1993, pp. 88-90.

[10] DIOP C. M., RUMEAU M. « Les fluorures dans les eaux et dans l'environnement », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, pp. 35-43.

[11] DIOP C. M., PONTIE M., RUMEAU M. « Défluoruration par les techniques à membranes », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, 1993, pp. 75-86.

[12] DIOP C. M., RUMEAU M. « Défluoruration des eaux par échange d'ions et par adsorption », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, 1993, pp. 68-74.

[13] DIOP C. M., NDIAYE M., PONTIE M., RUMEAU M., « Sur le problème de la fluorose au Sénégal : bilan des connaissances et présentation d'une nouvelle méthode de défluoruration des eaux de boisson », *Cahiers Santé*, N°1, Vol. 6, 1996, pp. 27-36.

[14] DRODZ J., TALL M. « Traitement des eaux hyperfluorées au Sénégal », EPT, Juin 1986.

[15] F. L., « L'arsenic, poison des jeunes deltas », *La Recherche*, Mai 2004, N°375, pp. 54-57.

[16] FAYE A., GAYE C. B., « Le fluor dans les eaux souterraines du Sénégal », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, 1993, pp. 13b – 13e.

[17] GUEDJ R., « La chimie et la vie - Aspect biochimique des dérivés organiques du fluor », *L'actualité chimique*, Mars 1976.

[18] HARDWICK L., « Défluoruration par voie générale », *L.Q.O.S.*, N°19, 1980, p. 29.

- [19] HITZKE J. « Les composés fluorés organiques et leur synthèse en milieux de sels fluorés », *L'actualité chimique*, Décembre 1979.
- [20] LAGAUDE A., NDAO I., TRAVI Y. « Défluoruration expérimentale des eaux souterraines du Sénégal par le polychlorosulfate basique d'aluminium », *Sciences et techniques de l'eau*, vol 26 N°3, Août 1992.
- [21] LAURENT G. « Le fluor : aspects physiologiques », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, pp. 15-16.
- [22] NDAO I. « Etudes des caractéristiques physico-chimiques de différentes eaux souterraines du Sénégal – Conception d'une station de défluoruration », UCAD, ENSUT, Novembre 1988.
- [23] NDOUR A. « Problématique de la concentration en fluorures dans l'eau des forages de la région de Diourbel : contribution à l'amélioration de la qualité de l'eau », *Projet de fin d'études*, E.S.P., Dép. Génie chimique et biologie appliquée, Dakar, Sénégal, 2001, p.5 ; pp.25-29.
- [24] NIANG, F. « Le problème des fluorures au Sénégal », UCAD, *1^{er} symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, 1993, pp. 5-9.
- [25] NIANG F. « Essais de défluoruration par le sulfate d'alumine de l'eau du forage N°1 de Fatick », *Symposium sur le fluor* 14 et 15 Juin 1993, Dakar, Sénégal, 1993.
- [26] STEPHEN K. W., « Différentes méthodes de fluoruration (sels, lait, comprimés, bains de bouche et gels), *L.Q.O.S.*, N°19, 1980, p.53.
- [27] TRAVI Y. « Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal – Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines », *Mém., Lab. Hydrogéol., Fac. Sciences, Univ. Louis Pasteur*, Mai 1988, pp. 9-10.

WEBLIOGRAPHIE

- [28] APPARAO B. V., KARTHIKEYAN G., MEENAKSHI S., TAMILNADU « Affordable water supply and sanitation - Defluoridation technology based on activated alumina », <http://www.lboro.ac.uk>, *21th WEDC Conference*, Colombo, Srilanka, 1994.
- [29] BALAGI « Defluoridation plants », <http://www.balajicastings.com>.
- [30] BEGTRUP, NYGAARD N., PETERSEN G. B. “Household Defluoridation with Bone Char in Nakuru, Kenya, 2001, <http://www.er.dtu.dk.htm>, Field investigation in developing countries, 2001.
- [31] BREGNHJ H, DAHI E., MTALO F., NJAU N., « Defluoridation using the Nalgonda Technique in Tanzania », <http://www.lboro.ac.uk.htm>, *22nd WEDC Conference*, New Delhi, India, 1996.
- [32] CHANTREL E., SAINT SAUVEUR «Techniques de clarification avec Moringa à différentes échelles», <http://www.moringanews.org>.
- [33] CHIDAMBARAM S., RAMANATHAN AL., VASUDEVAN S. “Fluoride removal studies in water using natural materials”, <http://www.wrc.org.za>, *Water SA*, Vol. 29, N°3, July 2003.
- [34] COETZEE P. P., COETZEE L. L., MUBENGA S., PUKA R., “Characterisation of selected south african clays for defluoridation of natural waters”, <http://www.wrc.org.za>, Rand Afrikaans Univ., July 2003.
- [35] DESHPANDE R. D., GUPTA K. “Depleting Groundwater Levels and Increasing Fluoride Concentration in Villages of Mehsana District, Gujarat, India: Cost to Economy and Health”, <http://www.globenet>, HEC of the HIC, S/C Enda TM, Dakar-Senegal, May, 1998.

- [36] FANGSREKAM N. « Defluoridation by bone char », <http://www.chiangmai.ac.th>, abstract.
- [37] GARMES H., MOUNTADAR M., PERSIN F., POURCELLY G., SANDEAUX J., “Defluoridation of groundwater by a hybrid process combining adsorption and Donnan dialysis”, <http://www.desline.com>, Fac. Sciences, Univ. Chouaib Doukkali, Maroc, Mars 2002.
- [38] GAVACH C., HICHOIR M., MOLENAT J., PERSIN F., SANDEAUX J., “Water defluoridation by Donnan dialysis and electro dialysis”, <http://www.rse.quebec.ca>, *Rev. Sci. Eau* 12 (4) : 671-686, 2000.
- [39] GLS « L'élimination du fluor dans l'eau destinée à la consommation humaine », <http://www.gls.fr.htm>, MEMOTEC N°15.
- [40] GRENOUILHAT F. « Le fluor », dép. chimie, Palais de la découverte.
- [41] LARSEN M.J., PEARCE E.I. “Defluoridation of drinking water by boiling with brushite and calcite”, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>, Aarhus, Denmark, 2002.
- [42] M. S. Swaminathan Research Foundation, <http://tickertape.net>.
- [43] MARRIAPIAN P., VASUDEVAN P. “Domestic defluoridation techniques and sector approach for fluorosis mitigation”, <http://www.twaboard.com>;
- [44] MARRIAPIAN P. “Development and performance of handpump attach defluoridation plant installed at palanpatty in tanthoni union of karur district”, <http://www.lboro.ac.uk>.
- [45] MAZET P. « Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde », <http://www.mpl.ird.fr/hydrologie>, Rap. Stage, Maison des sciences de l'eau, Montpellier.
- [46] MEJENGERA H., MKONGO G. “Appropriate defluoridation technology for use in fluorotic areas in Tanzania”, <http://www.wateronline.ihe.nl>, 3rd WaterNet/Warfsa Symposium

'Water Demand Management for Sustainable Development', Dar es Salaam, 30-31 October 2002.

[47] PADMASIRI J.P. «Sustainability in domestic defluoridation », <http://wedc.lboro.ac.uk>, 24th WEDC Conference Islamabad, Pakistan, 1998.

[48] SUSHEELA A.K. "Defluoridation Of Drinking Water: Merits Of Alternative Technologies", <http://www.nutritionfoundationofindia.org>, july 1992

[49] UNICEF, New Delhi "Combating fluorosis with household filters", <http://www.whoindia.org>, vol. 1, July 2003.

[50] UNICEF, "Fluoride in water an overview", <http://www.unicef.org>.

ANNEXE

ANNEXE 1 : Compléments sur le fluor

ANNEXE 1.1 : Grandeurs physico-chimiques des différents halogènes^[10]

Halogène.	rayon atomique (Å)	rayon ionique (Å)	énergie de liaison de l'électron Supplémentaire (Rilo calories)	électronégativité (O : 3,15)
F	0,65	1,12	95,5	3,95
Cl	1,07	1,91	92,5	3,20
Br	1,19	1,95	87,1	2,95
I	1,36	2,16	70,2	2,55

ANNEXE 1.2 : Composés insolubles avec les ions fluorures^[10]

Solubilité de quelques composés fluorés dans l'eau en mole par litre.

ions monovalents	solubilité (mole/l)	ions divalents	solubilité (mole/l)
LiF	0,05	BeF ₂	5,5
NaF	1	MgF ₂	1,9.10 ⁻³
KF	17	CaF ₂	3,1.10 ⁻⁴
RbF	12	SrF ₂	9,3.10 ⁻⁴
CsF	24	BaF ₂	1,2.10 ⁻²

Produit de solubilité de certains sels insolubles en fonction de la force ionique de la solution.

Composés insolubles	force ionique	log (produit de solubilité) pKs
CaF ₂	0	10,47
	0,1	9,8
MgF ₂	0	8,15
	0,1	7,6
PbF ₂	0	5,57
	0,1	6,9

ANNEXE 1.3 : Indice de fluorose communautaire (FCI) en fonction de la [C] de fluor dans l'eau de boisson^[1]

Région	Localité	[C] F ⁻ (mg/l)	Indice de fluorose (FCI)	Nombre d'enfants examinés
Thiès	Toubatoul	0,10	0,00	15
	Ndnamane	1,71	0,57	15
Diourbel	Ngakjou	0,49	0,28	16
	Khandiar	0,85	0,47	15
	Djimbé	1,32	0,58	30
	Ngoye	2,13	1,00	15
Kaolack	Kabatold	2,09	0,88	21
	Sibassor	2,85	1,07	15
Fatick	Loulsecene	2,74	1,05	17
	Darou Back	5,72	2,76	19
	Sorokh	4,56	3,04	13
	Ndiop	7,91	4,00	12

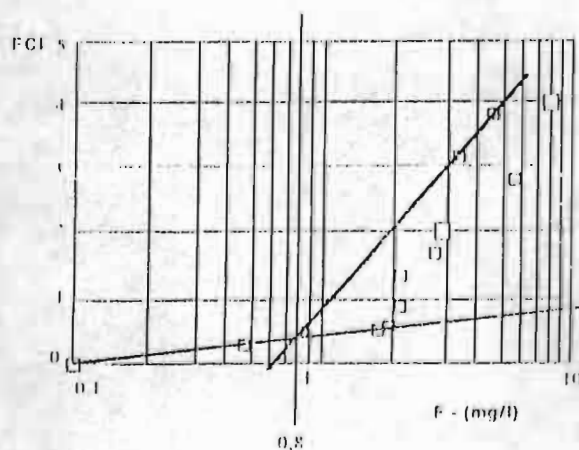
[C]F⁻ = Concentration de F⁻

ANNEXE 1.4 : Prévalence de la fluorose (%) en fonction de la concentration de fluor dans l'eau de boisson^[1]

[C] de F (mg/l)	Nombre enfants examinés	Distribution de la fluorose (DEAN)						Prévalence (%)
		Normal	Douteux	Très discret	Discret	Modéré	Sévère	
0 - 1	46	35 (75,95 %)	5 (10,55 %)	3	2	1	0	12,5
1,1 - 5	139	26 (18,46 %)	34 (23,94 %)	18	21	22	17	57,6
5,1 - 10	31	0	3 (9,66 %)	4	0	1	25	90,34
TOTAL	216	61 (27,46 %)	42 (19,32 %)	25	23	24	42	52,6

[C] = concentration

ANNEXE 1.5 : Détermination de la dose optimale de fluor en fonction de FCL et de la concentration en fluor de l'eau



ANNEXE 2 : Résultats d'essais de défluoruration au Sénégal

ANNEXE 2.1 : Essais réalisés sur l'eau de MONT ROLLAND, teneur d'environ 6,2 à 6,3 mg/l [14]

ANNEXE 2.1.1 : Essais sur le sulfate d'alumine

Sulfate d'Aluminium mg/l	Qualité de la floculation	pH	F ⁻ résiduel ppm
5	0	7,7	6,1
10	0	7,6	6,1
15	2	7,5	6
20	4	7,5	6
25	4	7,4	5,8
30	4	7,4	5,8
Eau brute		7,7	6,2

Sulfate d'Aluminium g/l.	Chaux mg/l	Qualité de la floculation	pH	F ⁻ résiduel ppm
0,6	500	4	6,5	1,6
0,7	500	4	6,4	1,5
0,8	500	4	6,3	1,4
0,9	500	4	6,3	1,3
1	500	6	6	1,4
1,2	500	4	5,8	2,1
Eau brute	-	-	7,8	6,4

Etude de la variation du sulfate, la chaux constante

Sulfate d'Aluminium g/l	Chaux mg/l	Quantité de la floculation	pH	F ⁻ résiduel ppm
1	50	2	4,8	3
1	100	4	5,2	2,8
1	200	4	5,4	2
1	300	4	5,8	1,3
1	400	6	5,8	1,2
1	500	6	5,9	1,1
Eau brute	-	-	7,9	6,4

Etude de la variation de la chaux, le sulfate constant

ANNEXE 2.1.2 : Essais sur l'alumine activée

Volume total du filtrat (l.)	pH	Vitesse de percolation (m/h)	F ⁻ résiduel. (ppm)
1	8,1	1,62	0,34
2	8,3	1,62	0,29
3	8,4	1,62	0,42
4	8,6	1,62	0,11
5	8,4	1,62	1
6	8,4	1,62	1,35
7	8,4	1,62	1,5
8	8,4	1,62	1,9
9	8,4	1,62	2,4
10	8,4	1,62	2,5
Eau brute	8	—	6,3

Filtration à travers un lit de 500 g d'alumine activée.

ANNEXE 2.1.3 : Essais sur la poudre d'os

Volume total de filtrat (l.)	pH	Degré de couleur (U.S.I.)	Turbidité (ppm SiO_2)	Niveau de fuite F^- (ppm)
1	8	10	3	0,3
2	8	5	2,6	0,3
3	8	5	2,6	0,34
4	8	5	2,6	0,4
5	8	5	2,5	0,42
6	8	5	2,5	0,5
7	8	10	3,5	0,4
8	8,1	5	2,1	0,5
9	8,1	5	2,1	0,55
10	8,1	5	2,1	0,46
11	8,1	5	2,1	0,58
12	8,1	5	2,1	0,63
13	8,1	5	2,1	0,7
14	8,1	5	2,1	0,8
15	8,1	5	2,1	0,9
Eau brute	8,1	5	1,8	6,2

Expérimentation de la granulométrie 0,42-0,59mm
 Vitesse moyenne de filtration : 1,6 m/h

ANNEXE 2.1.4 : Essais sur d'autres matériaux filtrants

Volume d'eau traitée	Nature du matériau filtrant		Vitesse ml/s	F ⁻ résiduel (ppm)
200 ml	25g	Latérite de Thies	0,071	0,8
200 ml			0,071	1,4
200 ml	25g	Latérite de Thies activée	0,18	0,4
200 ml	10g	Charbon de bois	0,052	4
1 ^{er} l	-	Sable brun Thies.	-	0,27
2 ^e l			-	1,2
3 ^e l			-	3
4 ^e l			-	4,6
5 ^e l			-	5,6
6 ^e l			-	6,4
Eau brute				6,4

Essais préliminaires: influence de quelques matériaux filtrants sur la défluoration.

ANNEXE 2.2. : Essais sur eau de Fatick (charbon actif, composé renfermant du Ca et du Mg, composé renfermant de l'aluminium; teneur initiale 6,8 mg/l [24])

Nature de l'ajout	Concentration g/l	Fluor résiduel mg/l	pH final
Aucun	-	6,2	- 8,4
Charbon (pH 8,4)	1	6,2	8,4
Charbon (pH 2,9)	1	5,8	2,9
Carbonate de Ca	10	6,2	8,8
Nitrate de Ca	10	5,6	7,2
Nitrate de Ca	1	5,8	7,6
Ca 0	1	5,2	11,4
Ca 0	0,5	5,4	10,3
Mg 0	10	0,44	10,5
Mg 0	5	0,55	10,4
Mg 0	2,5	0,80	10,4
Mg 0	1	1,6	10,4
Mg 0	0,5	3,2	10,2
Mg 0 + Ca 0	5 + 2,5	0,60	-
Mg 0 + Ca 0	2,5 + 1,25	0,58	-
Mg 0 + Ca 0	1 + 0,5	0,65	10,6
Mg 0 + Ca 0	0,5 + 0,25	2,9	-
Atapulgique	5	6,3	8,7
Talc	5	6,0	8,7
Oxyde d'Al	10	2,2	8,5
Oxyde d'Al	5	3,2	8,5
Oxyde d'Al	2,5	4,8	8,5
Oxyde d'Al	1	6,2	8,4
Sulfate d'Al	1	0,9	5,9
Sulfate d'Al	0,5	2,5	6,6
Alun de K	5	1,2	4,1
Alun de K	2,5	2,7	4,3
Alun de K	1	2,9	6,6
Alun de NH	5	1,1	4,1
Alun de NH	2,5	2,4	4,5
Alun de NH	1	2,5	6,6
Alun de Fe	5	3,2	4,1
Alun de Fe	2,5	4,5	4,7
Alun de Fe	1	6,0	6,8

ANNEXE 2.3. : Essais sur eau de Fatick, Diourbel, Kaolack, guinguinéo, Gossas [24]

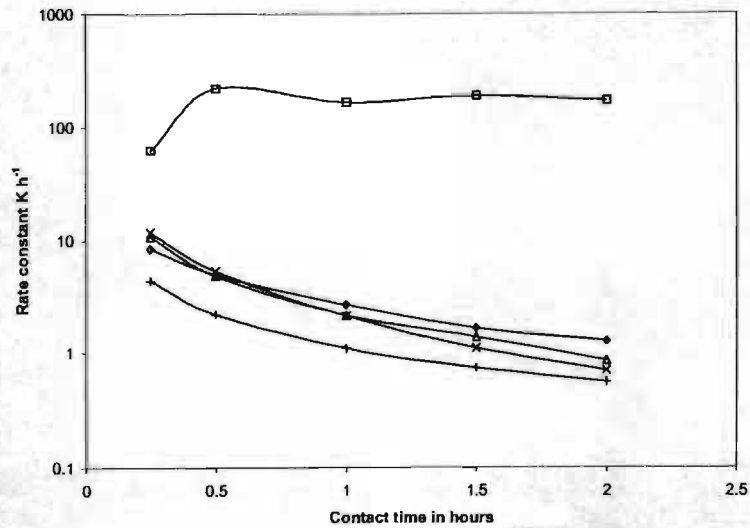
Forage	Eau brute			Sulfate d'al.			Polychlorosulfate		
	mg F/l g/m ³	pH	pH Cond	Cond. g/m ³			pH	Cond.	
BAMBEY	2,6	8,2	3,5	350	7,1	3,3	700	7,1	3,4
DIORBEL	3,6	8,3	2,8	430	7,3	2,6	1000	7,1	2,8
FATICK F1	6,0	8,3	3,1	700	7,3	3,1	1750	7,2	3,2
FATICK F2	3,9	8,5	3,3	430	7,5	3,3	1040	7,3	3,3
GUINGUINEO	3,7	8,5	2,2	400	7,5	2,2	1040	7,2	2,2
GOSSAS	2,7	8,6	2,5	300	7,1	2,5	650	7,2	2,5
KAOLACK F3	2,5	8,4	2,3	320	7,1	2,4	750	7,2	2,3
KAOLACK F4	2,7	8,4	2,3	290	7,0	2,3	710	7,4	2,4

ANNEXE 2.4 : Résultats d'essais de défluoruration par certains matériaux naturels en Inde [33]

ANNEXE 2.4.1 Fluoride removed in time intravels
Quantité de fluorures éliminée en fonction du temps

Fluoride removed in time intravels					
Time	Red soil	Charcoal	Fly-ash	Brick	Serpentine
15	0.64	9.05	3.4	4.7	3.7
30	0.09	9.05	3.7	4	4.1
60	0.06	9.1	4.7	3.7	4.6
90	0.035	9.05	6	4	4.8
120	0.029	9	7.1	3.9	5.8

ANNEXE 2.4.2 Fluoride removal as a function of $(t)^{1/2}$
L'élimination des fluorures, fonction de $(t)^{1/2}$



ANNEXE 2.4.3 Fluoride adsorption rate constant as a function of contact time
Débit d'adsorption des fluorures en fonction du temps de contact

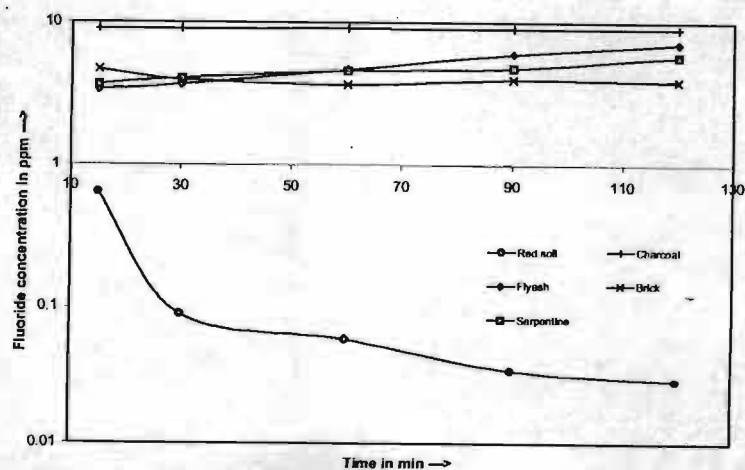
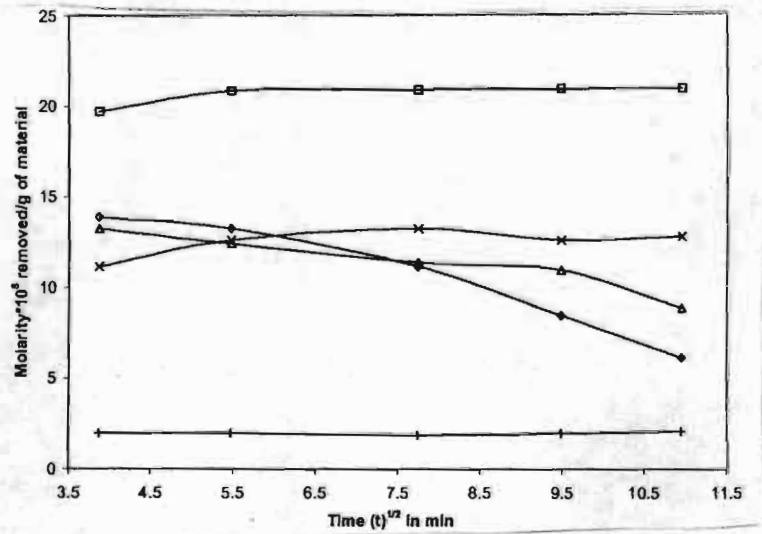


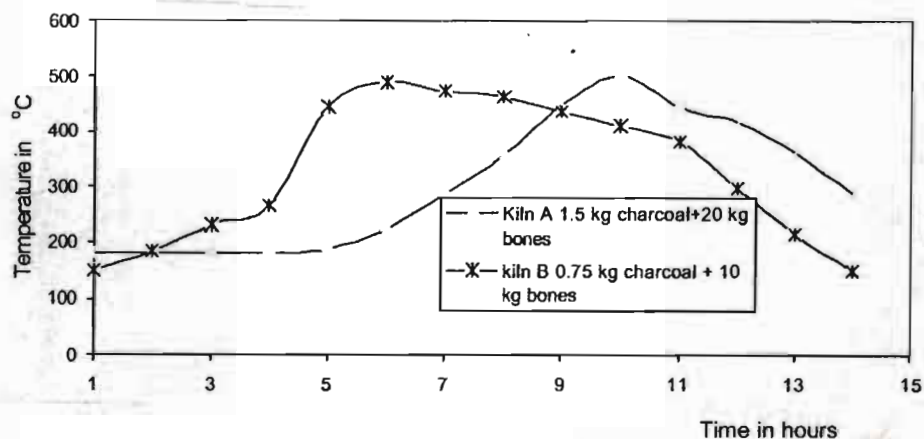
Figure 1
Fluoride removal capacities by natural materials

ANNEXE 2.4.4 Fluoride removal capacities by natural materials
Capacité de défluoruration des matériaux naturels

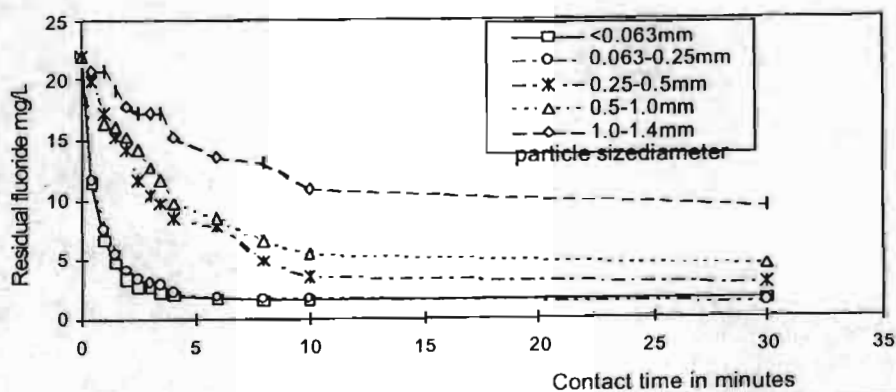


ANNEXE 3 : Essais réalisés dans le cadre de la défluoruration (Tanzanie) [46]

ANNEXE 3.1 Charring process in two different kiln showing temperature change with time
Processus de la carbonisation dans deux fours différents

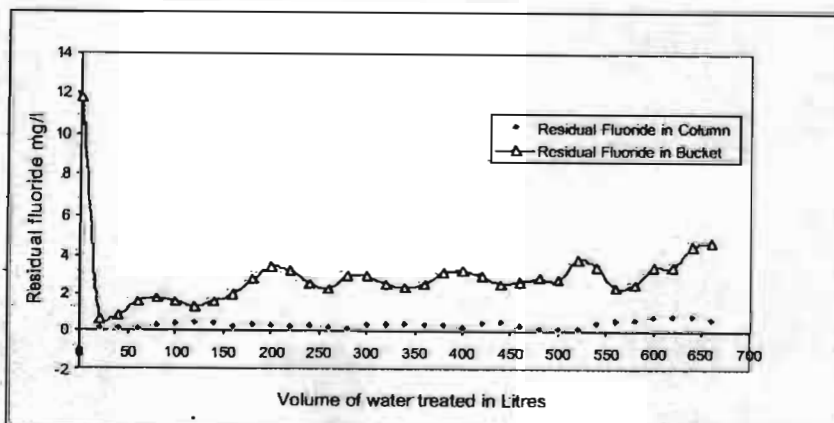


ANNEXE 3.2 Effect of grain sizes in fluoride removal
Effet de la dimension des grains dans le processus de la défluoruration



ANNEXE 3.3 Comparison of fluoride removal by column and bucket type cone char defluoridators

Comparaison de la défluoruration en utilisant d'une part, une colonne de noir animal et d'autre part des défluorurateurs sous forme de récipient.



ANNEXE 4 : Prix de quelques matériaux défluorurants



FERMON LABO SENEGAL S.A.

Société Anonyme au capital de 100.000.000 F.CFA

Représentant exclusif PANREAC - SIGMA

Matériels et Mobiliers Médicaux • Equipements Hospitaliers
Matériel et Verrerie de Laboratoire - Produits Chimiques - Milieux de culture

Dakar, le 25 Juin 2004

ESP THIES
DEPARTEMENT GENIE CIVIL
MADAME GAYE ADOU
TEL : 951 42 28/951 42 38

FACTURE PROFORMA N° 2004/06/127

CODE	DESIGNATION	QTE	PRIX UNITAIRE	PRIX TOTAL
PA-171100.1211	Alumine activée (oxyde de calcium) B/1 kg	1	27 000	27 000
PA-211234.1211	Chaux (oxyde de calcium) B/1 kg	1	13 000	13 000
PA-141101.1211	Sulfate d'alumine B/1 kg	1	17 000	17 000
CONDITIONS				
1. Confirmation par bon de commande. 2. Paiement à la livraison.				
TOTAL F CFA HTVA				57 000

REPRESENTANT EXCLUSIF AU SENEGAL DU GROUPE FERMON

31, Av. Jean Jaurès x Félix Faure - B.P. 11592 - DAKAR Sénégal
Tél. (221) 822 61 46 - 823 83 66 - 823 45 38 - Fax. (221) 823 45 85 - E-mail : fermonlb@sentoo.sn
RCCM : SN-DKR-97-B-244 - NINEA 0105470 2A2 - B.I.C.I.S. 095 20-004 307000/24 - SGBS K0011-01015 005 00081867