



Université des Sciences et Technologies Montpellier II
**DEA Sciences de l'eau dans l'environnement
continental**



MSE
DOCUMENTATION

Les eaux souterraines riches en fluor dans le monde

Rapport de stage de Pierre Mazet

**MAISON DES SCIENCES DE L'EAU de Montpellier
UMR 5569 HYDROSCIENCES CNRS-UMII- IRD**

**Responsable de stage:
Dr Anne Coudrain, Directeur de Recherche à l'IRD**

Avec la participation de Jean-luc Seidel, Monique Oï, et Claudine Dieulin



73497

juin 2002

035002859

Table des matières

INTRODUCTION	2
I) Norme de potabilité et aspect médical	3
II) Synthèse bibliographique mondiale	3
A) Résultats principaux	3
B) Création d'un site Web	6
III) Les sources de fluor	20
A) Les sources naturelles	20
B) Les sources anthropiques	21
IV) Etude de cas	22
A) Localisation de la zone d'étude	22
B) Matériels & Méthodes	22
1) Dosage du fluor	22
2) Dosage des ions majeurs	23
C) Résultats	24
1) Etalonnage de l'électrode sélective	24
2) Dosage du fluor	25
3) Dosage des ions majeurs	26
4) Spéciation du fluor	26
D) Interprétations et discussions	28
E) Conclusion	31
V) Les différentes méthodes de remédiation	31
A) Les techniques de défluoruration	31
1) Les procédés physico-chimiques	31
2) Les procédés physiques (ou techniques à membranes)	32
B) Conseils et remarques d'usage	33
1) Hydrologique	33
2) Domestique	33
CONCLUSION	34
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35
ANNEXES	37

Fonds Documentaire IRD Cote : A * 31017 Ex :

Introduction

La gestion de la ressource en eau est de nos jours l'un des principaux enjeux mondiaux, aussi bien au niveau des activités agricoles et industrielles que pour la consommation directe de la population. En effet, la croissance régulière de la demande, depuis plusieurs décennies, pose de plus en plus de problèmes à la fois d'ordre qualitatif et quantitatif. Parmi eux, celui de la salinité de l'eau souterraine illustre parfaitement le besoin de gestion en tenant compte des conséquences sur la qualité de l'eau.

Afin de pouvoir aborder ce sujet, notre intérêt se porte ici plus particulièrement sur les eaux souterraines riches en sels de fluor. Un travail sur ce thème, réalisé dans les années quatre-vingt-dix par l'UNICEF (1998) montrait déjà, à travers leur localisation sur un planisphère, qu'une vingtaine de pays présentaient des populations touchées par la fluorose. Cette maladie est provoquée par un apport excessif en fluor ($>7,75$ mg/jour) (OMS, 2002) sur une période minimale de cinq ans. L'analyse bibliographique effectuée, dans le cadre du stage de DEA, porte sur plus de 500 documents, issus des bases de données scientifiques, ainsi que d'articles parus sur le réseau Internet. Elle permet tout d'abord de montrer que l'estimation précédente doit être réévaluée à la hausse, avec un nombre de pays concernés s'élevant à plus d'une trentaine d'après cette nouvelle recherche.

De plus, un constat s'impose. Plus de la moitié de la littérature concernant le sujet est essentiellement orientée soit sur l'aspect médical, soit sur les différentes techniques de défluoruration des eaux. Or la mise en place et la maintenance de ces méthodes se révèlent la plupart du temps difficiles et coûteuses pour les populations touchées.

Il nous est donc apparu intéressant, comme préalable à des recommandations d'ordre préventifs, de mieux cerner les processus chimiques et hydrologiques à l'origine du contenu en fluor des eaux souterraines. A travers une synthèse bibliographique mondiale sur le thème de la fluorose et des eaux riches en fluor, nous avons renforcé l'évidence de ce problème de ressource en eau et la mise en valeur des relations avec la géologie et le climat des différentes régions concernées. De plus, une étude de cas menée sur l'Altiplano andin, région où la ressource souterraine en eau est déjà touchée par une forte salinité, nous permet à la fois d'appréhender un éventuel problème de santé et d'approfondir nos connaissances directes concernant la présence de fluor dans la ressource en eau.

Les réactions eau/roches ayant été largement étudiées et reconnues comme principales causes du contenu en fluor dans les eaux souterraines (Travi, 1993), notre travail montre cependant que d'autres processus tels que les conditions hydro-climatiques, l'exploitation intensive des nappes et certaines activités industrielles (aluminium, briqueteries) ou agricoles (engrais phosphatés) peuvent accentuer les concentrations et doivent être pris en considération.

Les résultats de ce travail de recherche se présentent sous forme de deux supports. D'une part, un « rapport papier » énonçant les principaux résultats de la synthèse bibliographique, le détail de l'étude effectuée sur l'Altiplano andin et une présentation des différentes méthodes de remédiation les plus couramment utilisées, et d'autre part un site web, réactualisable régulièrement, et organisé sous forme de base de données pour les pays concernés.

I) Norme de potabilité et aspect médical

Le rôle joué dans divers processus métaboliques par les éléments traces, notamment en tant que cofacteurs, est aujourd'hui bien reconnu et apparaît comme essentiel et bénéfique à la santé humaine. Néanmoins, lors d'une nette augmentation de leur quantité ingérée, certaines maladies peuvent apparaître.

Ainsi, l'exemple du fluor est assez révélateur de ce rôle prophylactique. En effet, alors que l'apport en faible quantité ($\geq 2.5\text{mg/jour}$) permet de prévenir ou de réduire la carie dentaire et le renforcement des os, une trop forte ingestion de cet élément ($>7.75\text{ mg/jour}$) (OMS, 2002) induit généralement le développement de pathologies telle que la fluorose dentaire ou osseuse. De très grandes quantités ayant pu même être mises en relation avec l'apparition de cancer (WaterAid, 2002).

En réponse au développement de ces maladies, essentiellement liées à la consommation d'eau riche en fluor, bien que les apports alimentaires, comme le thé (plus de 440 mg/l de fluor, Deshmukh et al 1995), ou une contamination atmosphérique (rejet d'industrie d'aluminium ou de briqueterie) puissent y contribuer, l'OMS fixa en 1972 la valeur tolérée en fluor dans les eaux destinées à la consommation à 0.8 mg/l pour les pays chauds et 1.5 mg/l pour les pays à climat tempéré. Cette différence correspondant au fait que de façon générale la consommation d'eau pour un individu donné augmente avec la température.

Cependant, dans des pays comme le Mexique, la mauvaise connaissance de la distribution et de l'évolution du contenu en fluor dans les eaux souterraines limite en grande partie l'efficacité des programmes de contrôle de qualité de l'eau distribuée (Trejo-Vazquez, 2001).

II) Synthèse bibliographique mondiale

A) Résultats principaux

La synthèse bibliographique réalisée sur le thème de la fluorose et de la présence de fortes teneurs en fluor dans les eaux souterraines dans le monde entier, nous permet tout d'abord de constater qu'une grande proportion de pays, parmi les 185 existants, connaissent à titre local (Angleterre, France, Italie) ou de façon plus générale (USA) une occurrence de concentration en fluor supérieure à 1,5 mg/l (norme OMS) dans les eaux souterraines. En outre, la gamme typique des teneurs en fluor des eaux souterraines s'étend de 0,01 mg/l à 4 mg/l (WaterAid, 2002) mais une prédominance des valeurs inférieures à 1 mg/l est tout de même remarquée (Bertrand, 2001). Des maxima supérieurs à 10 mg/l (18 mg/l en Inde) s'observent dans les eaux exploitées. Peu de problème de santé endémique en rapport avec ce phénomène sont cependant rapportés pour des pays tels que ceux cités précédemment, hormis l'Inde. L'absence de maladie est alors essentiellement due à la présence et la qualité d'un réseau de distribution comportant des infrastructures et des traitements adéquates ou bien encore à la possibilité, pour les populations concernées, d'avoir recours à une ressource en eau alternative (localisation d'une nappe phréatique non-contaminée dans les environs pouvant être raccordée au réseau de distribution, eaux embouteillées).

Cependant, notre travail montre que parmi la cinquantaine de pays (cf. liste p.7) possédant une référence attestant de la présence de concentrations en fluor supérieures à 1,5 mg/l, le problème de **la fluorose endémique concerne actuellement environ 30 pays répartis à travers les cinq continents.**

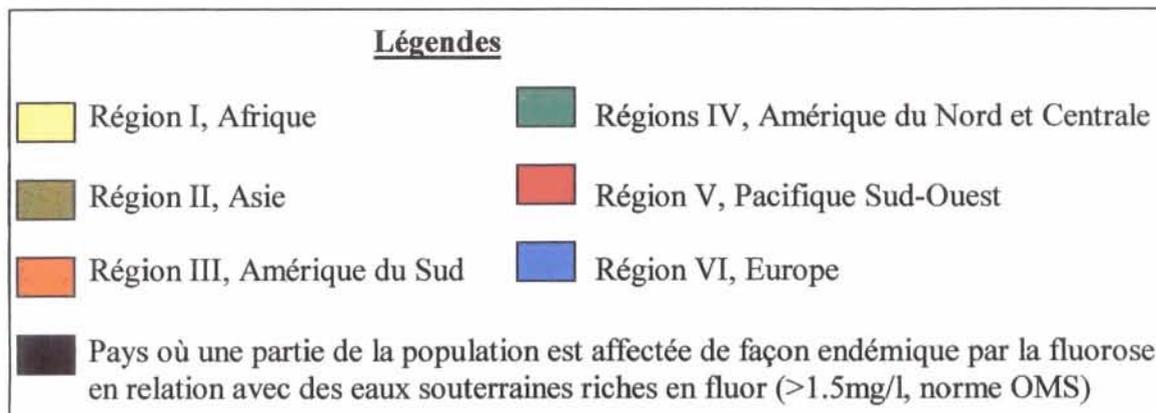
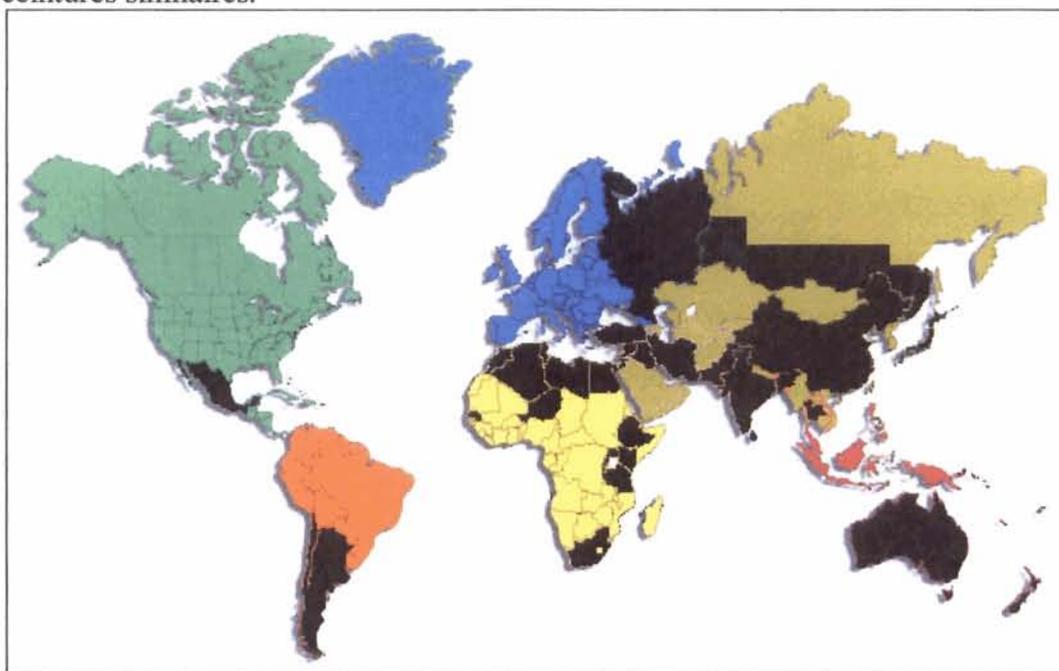
A ceux-la peuvent s'ajouter les pays pour lesquels les données ne sont pas disponibles mais aussi ceux que notre recherche ne nous a pas permis de déceler. Il est donc possible que l'ensemble des pays concernés soit encore supérieur à notre estimation.

Dans les années quatre-vingt, 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.

De nos jours, on remarque que ne serait-ce qu'au Mexique, la fluorose endémique est un problème de santé affectant autour de 5 millions d'habitants (Diaz-Barriga et al, 1997). En Chine, on enregistre environ 38 millions de personnes souffrant de fluorose dentaire et 1,7 million souffrant de fluorose osseuse plus grave. En Inde, selon certains auteurs comme Kumar et al (1991), la fluorose affecterait autour de 25 millions de personnes, dont 1 million de fluorose osseuse et invalidante, ce qui correspond à une proportion de 4% de fluorose grave sur l'ensemble de la population atteinte.

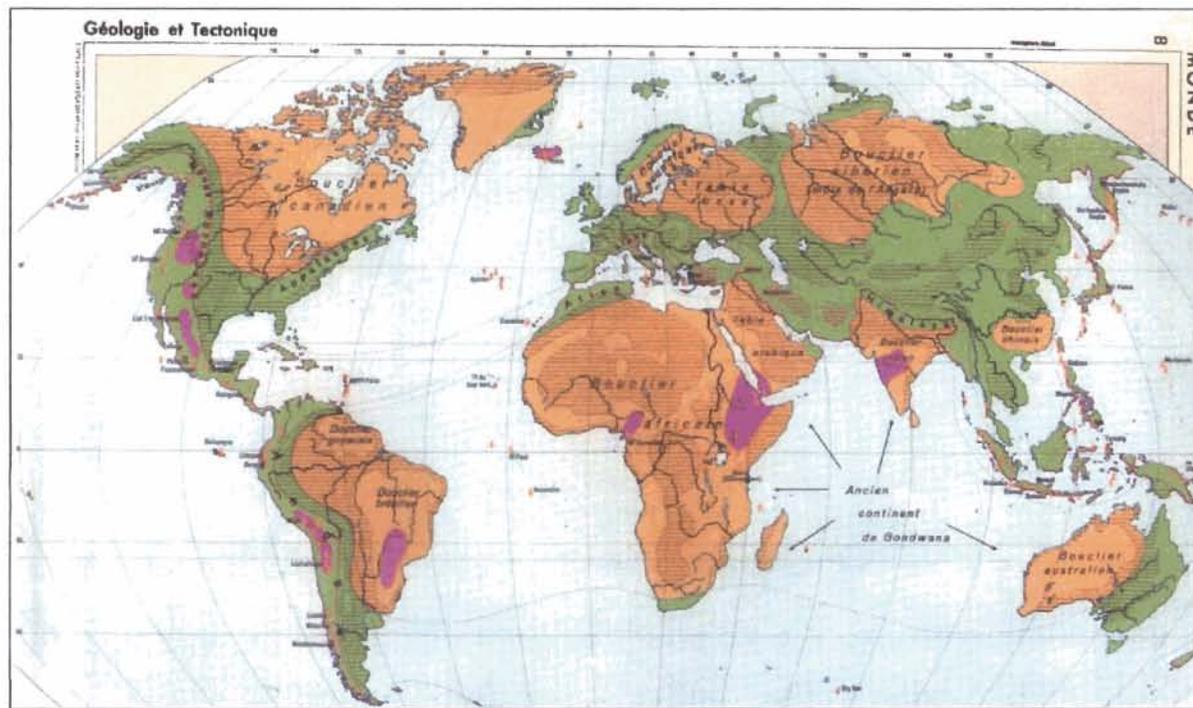
Ainsi en englobant d'autres populations comme celles de l'Afrique, à travers des pays tels que le Sénégal, le Niger, l'Ethiopie, le Kenya, la Tanzanie et l'Afrique du Sud, mais aussi celles du bassin méditerranéen, avec le Maroc, l'Algérie, la Turquie et l'Israël, ou encore d'Amérique du Sud avec l'Argentine, **le total de la population mondiale atteinte de fluorose excède très vraisemblablement les 70 millions.**

La carte 1, présentée ci-dessous et en grand format dans l'annexe 1, permet de constater que la distribution des pays affectés par la fluorose endémique révèle la présence de ceintures géographiques, comme celle s'étendant le long du Rift Est-Africain, de l'Erythrée jusqu'en Afrique du sud, ou encore le long d'une ligne partant de la Turquie, passant par l'Irak, l'Iran, l'Afghanistan, l'Inde, le Nord de la Thaïlande et la Chine. L'Amérique et le Japon possèdent des ceintures similaires.



carte 1 zones OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et localisation des 30 pays affectés par la fluorose endémique parmi les 50 répertoriés présentant des $[F] > 1,5$ mg/l.

Cette carte peut être comparée d'une part avec celle de la nature des roches (Carte 2 ci-dessous et Annexe 2) et celle de l'aridité d'autre part, définie par le rapport P/ETP entre les précipitations et l'évapotranspiration (Carte 3 ci-après et annexe 3).

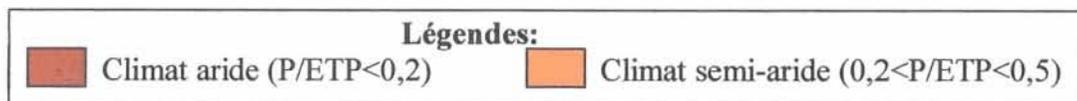
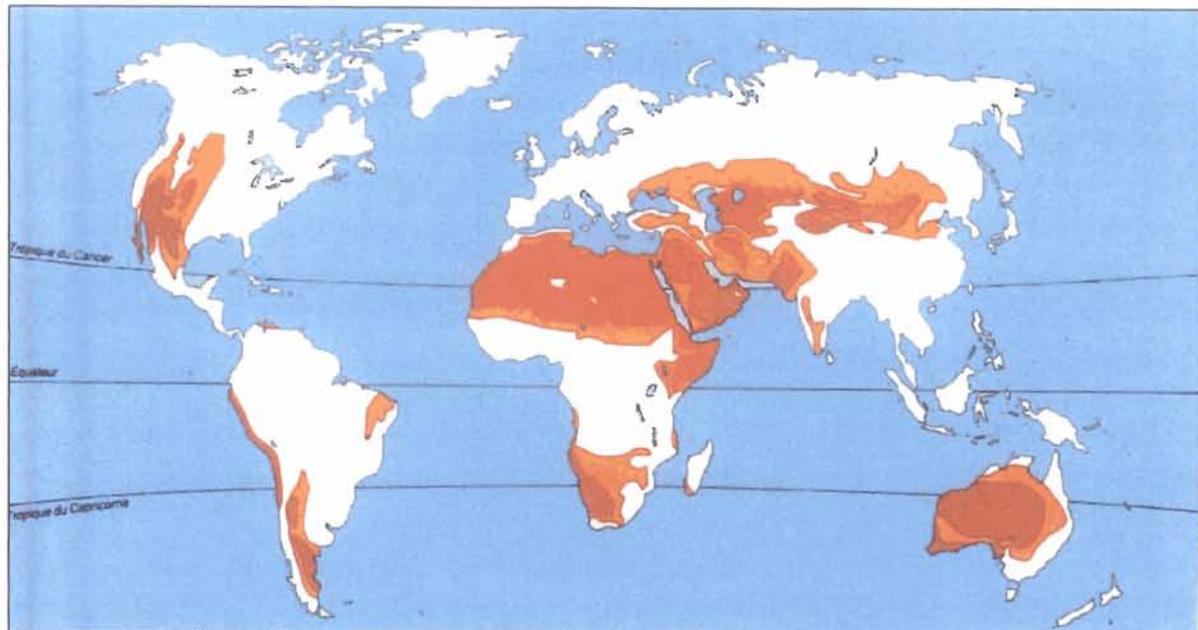


Légendes:

 Socle, continents primitifs	 Plissements primaires et récents
 Couverture sédimentaire	 Couverture volcanique

carte 2 Géologie mondiale simplifiée d'après Atlas Général Bordas (1957)

Durant le stage de DEA, nous n'avons pas trouvé de carte synthétique abordable, lisible et attrayante pour le grand public navigant sur le réseau Internet. Aussi nous avons élaboré une carte pour notre site, développé à partir de celle publiée dans l'Atlas Général Bordas (1957). Elle montre simplement (carte 2) les principaux ensembles géologiques du monde et permet de visualiser rapidement, à son échelle, le contexte majeur d'un endroit donné.



carte 3 Localisation des régions arides et semi-arides

En comparant les cartes 1 et 2, on constate que la fluorose affecte des pays pour lesquels la nature de roche prédominante est très diverse :

- bassins sédimentaires des pays d'Afrique du Nord et du Sahel
- zone volcanique de l'Est-Africain et du Mexique
- régions de socle en Inde ou en Australie

et sur laquelle nous reviendrons plus en détails dans la troisième partie « Sources de fluor ».

En comparant les cartes 1 de la fluorose et 3 d'aridité, on remarque que les régions géographiques touchées par la fluorose paraissent essentiellement développées dans les zones définies comme arides ou semi-arides. La conjonction de deux phénomènes bien connus permet de fournir une explication. Tout d'abord, la forte évaporation pour les zones arides et chaudes (Afrique du Nord, Mexique), entraîne un accroissement des concentrations dans l'eau résiduelle, puisque seule l'eau pure s'évapore. D'autre part, les faibles précipitations des régions arides entraînent généralement des temps de transfert de l'eau souterraine plus longs que dans les zones humides où les temps de renouvellement sont donc plus rapides. Il en résulte ainsi un temps de contact eau/roche plus long pouvant être à l'origine d'un enrichissement de l'eau en substances minérales dans les régions arides. A cela vient s'ajouter le fait que pour ces régions, l'eau souterraine correspond à la principale ressource en eau.

B) Création d'un site Web

L'intérêt d'un travail tel que celui qui a été réalisé durant ce stage de DEA étant à la fois de pouvoir visualiser l'ampleur des régions concernées mais aussi de rendre l'information accessible le plus largement possible, la décision fut prise d'utiliser le réseau Internet comme support de diffusion.

L'interface graphique du site permet à la fois de visualiser rapidement la localisation des régions touchées et de s'informer sur les diverses causes et conséquences liées à la présence de fluor dans les eaux souterraines destinées à la consommation humaine.

Grâce à la collaboration de Mme Monique Oï pour l'utilisation du logiciel de création de site web Dreamweaver et de Mme Claudine Dieulin pour la mise en forme des cartes, nous avons pu organiser l'ensemble des données (à partir de 500 articles référencés) recueillies sur le thème de la fluorose et des eaux souterraines riches en fluor sous forme de base de données réactualisable. En effet, l'information, rendue accessible par la navigation sur un planisphère, soit pays par pays à travers la présentation d'un document de synthèse (voire ci-dessous les exemples des documents réalisés pour l'Inde et l'Afrique du Sud) et d'un fichier bibliographique « national » Endnote, soit de façon globale à travers une recherche thématique sur la totalité de la bibliographie, peut à tout moment être remise à jour. L'adresse du site sur le réseau Internet n'est pour le moment pas encore définie.

Les pages suivantes présentent, à travers les exemples de l'Inde (en français) et de l'Afrique du Sud (en anglais), le type de document réalisé et exposé sur notre site, entièrement disponible dans ces deux langues. Près d'une cinquantaine de synthèses de ce type ont été effectuées pour les pays possédant une information sur la présence de fluor dans leurs eaux souterraines.

LISTE DES PAYS FIGURANT SUR LE SITE :

(en gras ceux concernés par la fluorose endémique en rapport avec des fortes concentrations en fluor dans les eaux de consommation, en clair les pays présentant des teneurs en fluor supérieures à 1,5 mg/l dans les eaux souterraines mais dont la population n'est pas affectée par la fluorose)

Afrique du Sud

Angleterre

Bangladesh

Brésil

Chili

Danemark

Espagne

Finlande

Inde

Israël

Kenya

Mexique

Norvège

Pakistan

Sénégal

Syrie

Tunisie

Uganda

Algérie

Argentine

Barhein

Bulgarie

Chine

Egypte

Ethiopie

France

Irak

Japon

Libye

Niger

Nouvelle-Zélande

République d'Haïti

Soudan

Tanzanie

Turquie

Zimbabwe

Allemagne

Australie

Bolivie

Canada

Cuba

Erythrée

Ex-Yougoslavie

Ghana

Iran

Jordanie

Maroc

Nigeria

Oman

Russie

Sri Lanka

Thaïland

U.S.A



(auteur, date) renvoie à la référence à la fin du texte et dans la "bibliographie"

- **Localisation des eaux souterraines riches en fluor**

- Région 1** Agra: (Tehsil Kheragarh), (Gupta 1999),(Pal 1983), (Singh 2000).
- Région 2** Alwar district: (Kumar 1998).
- Région 3** Andhra Pradesh: (Ahmed 1992), (Krishna 1985), (Kumar 1991), (Muralidhar 1999),(Nemade 2002), (Ozha 1993), (Sarma 1981), (Sarma 1997) (Sarma 1983), (Sukhija 1983).
- Région 4** Chandrapur district: Maharashtra, (Deshumkh 1995), (Kodate 1995).
- Région 5** District de Cuddapah : (Ramakrishna Reddy 2000).
- Région 6** Région de Dehli: (Datta 1996), (Ingh 1999).
- Région 7** Goa: (Keerthiseelan 2001).
- Région 8** Goudjerat: (Deshpande 1998), (Nema 1991), (Nemade 2002).
- Région 9** District de Katihar ,Bihardyu nord: (Jha 1997).
- Région 10** Karnataka: (Latha 1999), (Sukhija 1983), (Wodeyar 1996).
- Région 11** Madhya Pradesh: (Nawlakhe 1995), (Girhe 1996), (Munganeemea 1998).
- Région 12** Madras: (Somasundaram 1993).
- Région 13** Orissa: (Kundu 2001), (Sahu 1998), (Das 2000).
- Région 14** Rajasthan: (Agrawal 1997), (Datta 1999), (Gopal 1980), (Gupta 1986), (Kailash 1999), (Maithani 1998), (Nemade 2002).
- Région 15** Sri Lanka: (Padmasiri 1995).
- Région 16** Inde du sud: (Rajendran 1996).
- Région 17** bassin du Vamsadhara: (Srinivasa Rao 1997).

- **Concentration en fluor**

Région 1

➤(Gupta 1999) Dans les échantillons d'eaux souterraines analysées (de sources séparées), 27% étaient dans l'intervalle de concentration de Fluor: $[F^-] = 0-1,0$ mg/L, 25% dans l'intervalle 1.0-1,5 mg/L, 32% dans l'intervalle de 1,5-3,0 mg/L et 16% au-dessus de 3,0 mg/l. La concentration la plus élevée en fluorure enregistrée était 12,80 mg/l.

➤(Pal 1983) Une série de 113 échantillons d'eaux souterraines, des puits dans la région de semi-aride d'Agra, en l'Inde, contenant jusqu'à 148,8 mg/L de nitrate et jusqu'à 18,5 mg/l de fluorure.

Région 3

(Kumar 1991) Andhra pradesh: Les résultats indiquent une concentration élevée des fluorures dans les eaux souterraines allant de 0,3 à 6 mg/L.

Région 6

➤(Datta 1996) Les teneurs vont de 0,10-16,5 mg/l de fluorure dans les eaux souterraines.

➤(Singh 1999) Le sous-sol est alimenté par les effluents déjà pollués par les industries principales qui s'infiltrent de manière plus ou moins permanente.

Région 9

(Jha 1997) L'analyse de l'eau potable des différentes zones des régions de Katihar, du nord de Bihar, a montré que le niveau était anormal et que la teneur en fluor allait de 0,7 à 10,0 mg/L.

Région 10

(Latha 1999) La concentration de fluor varie de 1 à 7,4 mg/L.

Région 11

(Girhe 1996) On a observé une concentration élevée du fluorure s'échelonnant de 10 mg/L à 20 mg/L dans les eaux thermales de la région de Tattapani. Dans la région d'Unkeshwar les eaux thermales montrent une concentration en fluorure s'échelonnant de 7 mg/L à 12 mg/L.

Région 13

➤(Kundu 2001) Dans les eaux souterraines des villages de Singhpur et de Sagaragan dans la zone de Nayagarh d'Orissa, des concentrations élevées en fluorure ont été trouvées ($[F^-] > 1,5 \text{ mg/l}$) et mis en relation avec l'eau de source chaude riche en fluorure ($[F^-] > 10 \text{ mg/l}$).

➤(Sahu 1998) La concentration en fluorure est de 2,37 mg/L au Nuajamada, de 9,43 mg/L au Tarasingh, de 3,57 mg/L au Christian.

Région 14

➤(Gopal 1980) Dans la zone aride du Rajasthan occidental: les concentrations en fluorure étaient 0.3-20 mg/l.

➤(Maithani 1998) Les échantillons d'eau analysés montrent une teneur en fluor supérieur à 5 mg/L et un confinement dans les villages de Wan et Andor.

➤(Kailash 1999) Les habitants du Rajasthan sont forcés de consommer l'eau avec des concentrations en fluorure allant jusqu'à 44 mg/L.

Région 15

(Padmasiri 1995) Les eaux souterraines ont une teneur en fluor de 4 mg/L.

- **Caractéristiques hydrogéologiques**

Région 8

(Gupta 1998) Géologiquement la zone comporte des sédiments alluviaux non-consolidés apportés par le transport fluvial.

Région 5

(Gupta 1998) Les aspects géologiques, hydrologiques (surface et eaux souterraines) et géochimiques, ont été étudiés pour le développement et la gestion des ressources en eau dans la zone de sécheresse de Cuddapah. Les unités lithologiques principales sont cristallines, quartziques, des shales et des calcaires.

Région 17

(Srinivasa Rao 1997) On a observé des concentrations élevées en fluorure dans les eaux souterraines atteignant un maximum 3,4 mg/L. Les formations superficielles sont constituées d'amphibolites, de pegmatites et de pyroxènes. Les eaux souterraines dans les sols argileux contiennent beaucoup moins de fluorure que les sols arénacés. La composition de ces sols arénacés et argileux joue un rôle important dans la distribution spatiale inégale du fluorure dans les eaux souterraines.

- **Hydrochimie (pH, majors ions etc)**

Région 1

(Gupta 1999) La concentration la plus élevée en fluorure enregistrée est de 12,80 mg/l. On a observé une corrélation significative du fluorure avec le pH, l'alcalinité, le Na, le SiO₂ et le PO₄.

Région 7

(Keerthiseelan 2001) Les rapport ioniques Na⁺/Cl⁻, Cl⁻/(CO₃²⁻ + HCO₃⁻), Na⁺/(Ca²⁺ + Mg²⁺) et Br⁻/Cl⁻, dans les eaux montrent que les acides forts sont plus importants que les acides faibles dans les terres alcalines. Et ces rapports ioniques sont comparables aux taux ioniques moyen de l'eau de mer.

Région 11

(Nawlakhe 1995) Les problèmes principaux de la qualité de l'eau sont dus à la présence de nitrates, de fluor, des TDS et à la dureté de l'eau.

Région 13

(Kundu 2001) Les études thermodynamiques prouvent que plus de 65% des eaux souterraines et des échantillons des sources d'eau chaude sont sursaturées en calcite, et seulement 4 échantillons sont sursaturés en fluorite.

- **Activités anthropiques**

Région 1

(Singh 2000) Les industries de galvanoplastie, d'aluminium, d'acier et d'engrais contribuent également à la fluorisation des eaux par leurs effluents.

Région 5

(Ramakrishna Reddy 2000) L'utilisation intensive des eaux souterraines pour l'irrigation, l'industrie et pour la consommation d'eau potable entraîne la diminution du niveau de la nappe phréatique, asséchant ainsi le haut des puits et entraînant des problèmes de qualité.

Région 6

➤(Ingh 1999) Dans les zones urbaines de Delhi, la contamination des eaux souterraines par les effluents industriels et domestiques devient un problème préoccupant.

➤(Singh 1999) Les eaux souterraines, dans laquelle les effluents des industries s'infiltrent, sont maintenant polluées de façon définitive.

Les sols ont vu s'ajouter du fluor à leur composition initiale (d'origine géologique), à cause des fertilisations des sols qui ont par infiltration pollué les eaux souterraines.

La fluoration des eaux souterraines a lieu à cause d'une irrigation et d'une fertilisation intensives. Il y a aussi une pollution de ces eaux par les rejets des industries produisant de l'acide fluorhydrique, des briques et des semi-conducteurs.

• Traitement de l'eau

Région 1

(Singh 2000) La défluoruration des eaux souterraines de la ville d'Agra utilise une méthode au charbon actif de résidus de blé, obtenue à partir d'une centrale thermique.

Région 3

(Renaud 1998) La méthode de remplissage artificiel pour la défluoruration est la plus simple des méthodes et la mieux adaptée aux conditions climatiques de la zone. Cette dernière consiste à diluer les eaux riches en fluorures par une eau de réserve contenant une concentration faible en fluor.

Région 8

(Nema 1991) L'étude de traitement en laboratoire permet de déterminer les teneurs suffisantes d'aluminium et de chaux pour ramener le taux de fluor à la valeur de 1 mg/L exigée.

Région 10

(Latha 1999) La méthode pertinente et bon marché de défluoruration biologique est ici la meilleure alternative par rapport aux méthodes conventionnelles.

Région 16

(Padmasiri 1995) Le charbon actif est actuellement utilisé sur une échelle pilote comme méthode de filtrage pour l'enlèvement de fluorure. Cependant, cette méthode est chère et impopulaire. Réciproquement, une méthode à prix plus réduit à l'aide d'un filtre ascendant, nouvellement conçu, pour les écoulements domestiques a montré des résultats prometteurs. Le filtre fait 75 cm de haut, 20 cm de diamètre et a une capacité de 16 litres de l'eau. Le support de filtrage est de l'argile riche en fer brûlée à basse température et l'ordre de grandeur est de 16mm à 18mm. L'argile brûlée est constituée

de silicates, d'aluminates et d'hématites. Huit litres d'eau à basse teneur en fluorure ont pu être retirés de ce filtre au bout de huit d'heures. Les eaux souterraines ayant une valeur de fluorure de 4 mg/l pourraient être réduites à moins de 1 mg/l à l'aide du filtre qui se conforme aux normes de l'OMS pour le fluorure.

- **Processus hydrochimiques**

(Saxena 2001) Les résultats expérimentaux indiquent qu'un milieu alcalin (avec un pH allant de 7,6 à 8,6), une concentration élevée en HCO_3 (s'échelonnant de 350 à 450 mg/l), et une conductivité spécifique modérée (s'étendant de 750-1,750 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont favorables à la dissolution de fluorure. Aucune corrélation significative n'a été démontrée entre le fluorure et le CaHCO_3 .

- **Climat**

L'Inde a un climat chaud qui doit beaucoup au mécanisme des moussons.

- **Bibliographie** fichier **Endnote**

Agrawal V., Vaish A.K., Vaish P. (1997) - Groundwater quality: Focus on fluoride and fluorosis in Rajasthan. *Current Science* **73**: 743-746.

Ahmed S., Murali G. (1992) - Regionalization of Fluoride Content in an Aquifer. *Environmental Hydrology* **1** (1), (6 fig, 1 tab, 8 ref): 35-39.

Das S., Mehta B.C., Samanta S.K., Das P.K., Srivastava S.K. (2000) - Fluoride hazards in ground water of Orissa, India. *Indian-Journal-of-Environmental-Health* **42** (1): 40-46.

Datta P.S., Deb D.L., Tyagi S K (1996) Stable isotope (^{18}O) - investigations on the processes controlling fluoride contamination of groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* **24** (1): 85-96.

Datta P.T., Tyagi S.K., Mookerjee P., Bhattacharya S.K., Gupta N., Bhatnagar P.D. (1999) - Groundwater NO_3 and F contamination processes in Pushkar valley, Rajasthan as reflected from ^{18}O isotopic signature and ^3H recharge studies. *Environmental Monitoring and Assessment* **56** (2): 209-219.

Deshmukh A.N., Kodate J. (1995) - Cost Effective and Innovative Structures for Direct Recharge of Aquifers of Fluorosis Endemic Areas : A Case Study of Chandrapur District. *Gondwana Geol. Mag* **9**: 197-201.

Girhe S.N., Patil, Manjusha R. (1996) - Geochemical study of high fluoride in geothermal water of Tattapani, Madhya Pradesh and Unkeshwar, Maharashtra. National seminar on geothermal energy resources in India, Nagpur, India, [Monograph] Geothermal energy in India, Geological Survey of India, Calcutta, India (IND).

Gopal R., Bhargava T.N., Bhati O.P., Tak T.C., Ghosh P.K. (1980) - Salinity and Toxicity of Brackish Waters of Arid Zones of Western Rajasthan. *Annals of Arid Zone* **19**(3), (2 Tab, 2 Ref): 248-250.

Gupta M., Singh V., Rajwanshi P., Agarwal M., Rai K., Srivastava S., Shrivastav R., Dass S. (1999) - Groundwater quality assessment of Tehsil Kheragarh, Agra (India) with special reference to fluoride *Environmental Monitoring and Assessment* **59** (3): 275-285.

Gupta S. C., Doshi C.S., Paliwal B.L. (1986) - Occurrence and Chemistry of High Fluoride Groundwaters in Jalore District of Western Rajasthan. *Annals of Arid Zone ANA2BX* **25** (4), (5 fig, 3 tab, 11 ref.): 255-264.

Gupta S.K., Deshpande R. D. (1998) - Depleting Groundwater Levels and Increasing Fluoride Concentration in Villages of Mehsana District, Gujarat, India: Cost to Economy and Health. *Habitat and Environment Committee of the Habitat International coalition*; S/C Enda TM/Rup-BP, 3370 Dakar-Senegal.

Ingh R. B. (1999) - Urban impacts on groundwater quality in the Delhi region. Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality; an international symposium held during IUGG 99, International Association of Hydrological Sciences, Birmingham, United Kingdom.

Jha N.N., Poddar S.N., Mandal T.N., Sinha A.K. (1997) - Fluoride content in groundwater and fluorosis in human population in Katihar District of North Bihar, India. *Journal of Freshwater Biology* **9** (2): 98-100.

Kailash C., Argawal S. Gupta K., Akhilendra B. Gupta (1999) - Development of new low cost defluoridation technology (krass) *Water Science and Technology* **40** (2):167-173.

Keerthiseelan K., Kapoor S.L., Suresha A., Prakash T.R.(2001) - Salinity intrusion from tidal recharge and its impact on groundwater quality in Goa *State Journal of the Geological Society of India. Bangalore* **57** (3): 257-262.

Kodate J. K., Sharma J.S., Wadaskar P.M., Gajbhiye R.D. (1995) - Hydrochemistry of calcareous Vindhyan aquifers of fluorosis endemic korpana tehsil, district Chandrapur, Maharashtra. *Gondwana Geol. Mag* **9**: 45-53.

Krishna M.K., Mattaiah G., Venkatappaiah A. (1985) - Hot Water Seepage into Shallow Coal Mines of Manuguru Coalbelt, Godavari Valley Coalfield Andhra Pradesh, India. *Mine Water Proceedings of the Second International Congress* **2** (fig, 2 tab, 7 ref): 979-989.

Kumar S., Saini D.K. (1998) - Status of fluoride in ground water of Alwar District in Rajasthan *Journal of Environment and Pollution* **5** (4): 299-305.

Kumar V.V., Sai C.S.T., Rao P.L.K.M., Rao C.S. (1991) - Studies on the distribution of fluoride in drinking water sources in medchal block, Ranga Reddy District, Andhra Pradesh, India. *Journal of Fluorine Chemistry; Elsevier, Lausanne, Switzerland (CHE)* **55** (3): 229-236.

Kundu N., Panigrahi M. K., Tripathy S., Munshi S., Powell M.A., Hart B.R. (2001) - Geochemical appraisal of fluoride contamination of groundwater in the Nayagarh District of Orissa, India. *Environment Geology* **41**(3-4): 451-460.

Latha S.S., Ambika S.R., Prasad S.J. (1999) - Fluoride contamination status of groundwater in Karnataka *Current Science* **76** (6): 730-734.

Maithani P.B ;Gurjar R., Banerjee R., Balaji B.K., Ramachandran S., Singh R. (1998) - Anomalous fluoride in groundwater from western part of Sirohi district, Rajasthan and its crippling effects on human health. *Current Science* **74** (9) : 773-777.

Muralidhar M., Rajandra Prasad J., Raveena P., Prasad Raju K.S.V., Sudarshan Ch.R. (1999) - Hydrofluorosis - A built in environmental hazard. 29. Congress of the International Association of Hydrogeologists, Bratislava (Slovak Rep.), HYDROGEOLOGY AND LAND USE MANAGEMENT, Geological Survey of Slovak Republic, Mlynska dolina 1 817 04 Bratislava Slovak Republic, Department of Geology, Osmania University, Hyderabad, India.

- Nawlakhe W.G., Lutade S.L., Patni P.M., Deshpande L.S.** (1995) - Groundwater quality in Shivpuri district in Madhya Pradesh *Indian Journal of Environmental Health* **37** (4): 278-284.
- Nema P., Metha C.G., Abraham S, Gokhe B H, Kankal N C** (1991) - Defluoridation programme in Gujarat - implementation and operational aspects. *Journal of Indian Waterworks Association* **23** (1): 45-50.
- Nemade P.D., Vasudeva Rao A., Alappat B.J.**(2002) - Removal of fluorides from water using low cost adsorbents. *Water Supply* **2** (1): 311-317.
- Ozha D.D., Jain P.C.** (1993) - Imbalances of some chemical constituents in the ground waters of arid environment of Rajasthan. *Journal of Indian Water Works Association* **25** (1): 31-35.
- Padmasiri J.P., Fondeta W.S.C.A., Liyanapatabendi T.** (1995) - Low cost fluoride removal by an upward flow household filter. The IWSA International Specialized Conference on Advanced Treatment and Integrated Water System Management into 21st Century, Osaka, Jpn, 05/15-17/95, BLACKWELL SCIENTIFIC PUBLISHERS, OXFORD, (ENGL).
- Pal B.** (1983). Potential Hazards of Nitrate and Fluoride in Underground Water. *Water Research* **17**(3), (2 Tab, 14 Ref): 353-354.
- Rajendran S., Samama J.C., Sapor L., Chandrasekaran V.A., Moses Edwin J.** (1996) - Contamination of fluoride in groundwater; a case study from Tiruchirapalli District, Tamil Nadu, South India. 6. congreso nacional y conferencia internacional de Geologia ambiental y ordenacion del territorio, Granada, Spain, ITGE, Madrid, Spain (ESP).
- Ramakrishna Reddy M., Janardhana R., N; Venkatarami Reddy, Y; Reddy, TV** (2000) - Water resources development and management in the Cuddapah district, India. *Environmental Geology* **39** (3/4) : 342-352.
- Munganeemea M., Renaud V.** (1998) - l'eau des les pays en voie de développement. www-dessgp.unice.fr/pages/basedonnee/thenv/pvd/garde.htm.
- Sahu S.K., Pathi S.S., Badapanda R.K.** (1998) - Fluoride content in ground water around an aluminium industry in Hirakund, Orissa. *Environment and Ecology* **16** (1): 169-171.
- Sarma D.D.R, Rao S.L.N.** (1997) - Fluoride concentrations in ground waters of Visakhapatnam, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **58** (2): 241-247.
- Sarma Jagannadha V.V., Swamy A.N.** (1983) - Common Composition Characteristics of Fluoride Bearing Groundwaters. *Water, Air and Soil Pollution* **20** (1): 29-39, (1 Tab, 12 Ref).
- Sarma V., Swami A.N.** (1981) - Groundwater Quality in Visakhapatnam Basin, India. *Water, Air, and Soil Pollution* **16** (3): 317-32.
- Saxena V.K., Ahmed S.** (2001) - Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. © Springer-Verlag 2001, <http://link.springer.de/link/service/journals/00254/contents/01/00290/s002540100290ch002.html>.
- Singh R.B.** (1999) - Urban impacts on groundwater quality in the Delhi region. Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality; an international symposium held during IUGG 99, Birmingham, United Kingdom, July 18-30, 1999, International Association of Hydrological Sciences, International (III).

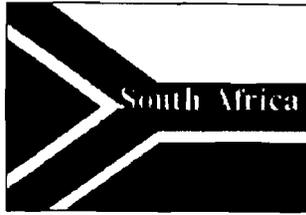
Singh R.B., Singh Y., Swaroop D. (2000) - Defluoridation of Groundwater in Agra City Using Low Cost Adsorbents. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **65** (1): 120-125.

Somasundaram M., Ravindran G, Tellam JH (1993) - Ground-Water Pollution of the Madras Urban Aquifer, India. *Ground Water GRWAAP* **31** (1), (2 fig, 3 tab, 47 ref) : 4-11.

Srinivasa_Rao N. (1997) - Présence et comportement des fluorures dans les eaux souterraines du bas bassin du Vamsadhara (Inde). *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques* **42** (6) : 877-892.

Sukhija B. S., Achutha-Rao A. (1983) - Environmental tritium and radiocarbon studies in the Vedavati River basin, Karnataka and Andhra Pradesh, India *J. Hydrol.* **60** (1/4): 185-196.

Wodeyar B.K., Sreenivasan G. (1996) - Occurrence of fluoride in the groundwaters and its impact in Peddavankahalla basin, Bellary District, Karnataka- a preliminary study. *Current Science* **70** (1) : 71-74.



(author year) refers to a publication cited below and in the "bibliography".

- **Localisation of area with high fluoride content in groundwater**

- Area 1)** Republic of Bushveld, nord, NE et NW du Cap (Calvinia, Karoo), (Cavé, 1998), (Botha and al 2002).
- Area 2)** Northern Springbok, (fayazi 2002),
- Area 3)** Republic of Bophuthatswana, (McCaffrey 2002).
- Area 4)** Northern Transvaal, North West and Northern Cape provinces,(Meyer 2002).

- **Fluoride concentration**

Area 1)

- (Travi 1993) cites [F] ≥ 1 mg /L
- (Cavé 1998) Karoo : Groundwater from Kopoasfontein is characterised by high pH (9.8) ; High concentrations of F⁻ (12 mg/L) and As (0.33 mg/L).
- (McCaffrey 2002) Inside the Pilanesberg Alkaline Igneous Complex, mean [F]= 3.7 mg/L and very high F concentrations with max [F]= 57 mg/L are found around the perimeter

Area 2)

- (Fayazi 2002) A relatively high fluoride level was recorded and a peak value of 25,4 mg/L has been recorded on the farm Minerva; However the fluoride level in groundwater from the basaltic aquifer is generally less than 1,5 mg/L.

- **Hydrogeological characteristics:**

Area 1)

- (Travi 1993): In the granitic solid masses "Old Red Granite, Gneissoid Complex" and sedimentary (erosion of mudstone and shale by hydrothermalisme; dissolution of the fluorapophyllite).
- (Fayazi 2002) The Karoo Sequence rests unconformably on rocks of the Bushveld Igneous Complex, the Rooiberg Group and sediments of the Waterberg Group.

- (Cavé 1998) The groundwater in breccia pipe is situated inside the Pilanesberg Alkaline Igneous Complex. High F concentrations in groundwater are also found in the Nebo Granite and the mineralised Lebowa Granite. Microscopic study of thin sections of common rock types from the area shows that fluorite, mica and hornblende are the most common F bearing minerals.

- (Cavé 1998) Karoo : Late stage secondary minerals have also been deposited in the brecciated shale environment by hydrothermal solutions. Quartz, calcite, chlorite and metal sulphide minerals (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, galena) occur as vein minerals in the breccia and as coatings on the walls of fractures and cavities.

Area 2)

- (Fayazi 2002) Shales and sandstones (Ecca Group), Mudstones and siltstones (Irrigasi Sediments), sandstones from the Clarens Formation (183m) and finally basalts of the Letaba Formation (659m).

- **Characteristics of water (pH, majors ions) :**

Area 1)

- (Cavé 1998) Base cations in the rock are dominated by K, Mg and Na, but Ca concentrations are generally low. Groundwater from Kopoasfontein is characterised by high pH (9.8).

- (McCaffrey 2002) Karoo. The distribution and hydrogeochemistry of fluoride-rich groundwater in areas surrounding the Pilanesberg are under investigation.

- **Water treatment :**

- (Ginster 2002) Waste water with high fluor content are used for irrigation. The pre-treatment by gypsum reduces the F content of the water from 160mg/L to 40 mg/L.

- (Schoeman 2002) Both activated alumina and reverse osmosis processes can be effectively applied for water defluoridation.

- **Climate :**

- South Africa has a temperate climate that is influenced by the warm Agulhas current from Mozambique as well as the Indian Ocean to the east and the cold Benguela current from the Atlantic Ocean on the west coast. Most rainfall occurs as a result of moist warm Indian Ocean air currents while distribution decreases from east to west. Average annual precipitation varies from 400 mm (16 inches) in the east to less than 50 mm (2 inches) in the northwest coastal regions. Average annual precipitation in Cape Town is 510 mm (20 inches) and average temperature ranges from 9 to 17 degrees Celsius (48 to 63 Fahrenheit degrees) in July and from 16 to 27 degrees Celsius (61 to 81 Fahrenheit degrees) in February.

- **Remarks :**

Area 1)

- (Fayazi 2002). In sedimentary rocks, the fluoride is usually hosted in fluorite, micas, amphiboles, apatite and clay. Fluoride in groundwater may originate from the most common fluoride-bearing mineral, i.e. fluorite (CaF₂). Fluorite is known to occur in the granites of the Bushveld Complex which surround the basins of the Springbok Flats. During arid erosional episodes, weathered products derived from granitic rocks containing fluorite were carried into the basin of deposition and have accumulated locally in the Karoo sediments which later resulted in an enrichment of fluoride in the groundwater. In general, the fluoride level in groundwater from the Northern Springbok Flats is strongly controlled by the geochemistry of the rock in which groundwater is encountered.

- (Du_Plessis 2002) Dental fluorosis is a sign of chronic fluoride poisoning. The children under six to seven years of age are first affected in the population. Unfortunately this is only seen years after the damage, which is irreversible.

- (McCaffrey 2002) The Bushveld is known to have endemic dental fluorosis. Skeletal fluorosis occurs sporadically to the north of the area.

- (Rudolph 2002) The prevalence and levels of dental fluorosis for children and adults has been studied for 4 villages with a fluoride range in water from 0.1 to 7-8 mg/L. As expected, high fluorosis was found at a village with high fluoride content in water. However, signs of fluorosis were identified in a few subjects exposed to recommended safe levels (0.4-0.9 mg/L) that raises the question of safe levels of fluoride in water.

- **Bibliography :** fichier **Endnote**

Cavé, L. (1998). "Geochemistry of artificial groundwater recharge into the Kopoasfontein breccia pipe near Calvinia, Karoo." (Conférence. 5. International Symposium Geochemistry, Cape Town (South Africa), 24-28 April 2000.(World Meeting Number 000268)).

Du_Plessis, J. B. (2002) "What would be the Maximum Concentration of Fluoride in Water that will not cause Dental Fluorosis?" <http://www.uct.ac.za/depts/geolsci/grads/contents.html>.

Eriksson, P. G.; Alterman, W.; Els, B.G.; Tirsgaard, H. (2002). "The African Renaissance and the Geosciences: introduction. Journal of African earth Science.

Fayazi, M. (2002). "Distribution of fluoride in groundwater of the Northern Springbok flats." <http://www.uct.ac.za/depts/geolsci/grads/contents.html>.

Ginster, M.; Fey, M.V. (2002). "Soil and Plant Responses to Irrigation with a Fluoride-rich Waste Water." <http://www.uct.ac.za/depts/geolsci/grads/contents.html>.

Rudolph, M.J.; Molefe M.; Chikte U. M. E. (2002). "Dental Fluorosis with Varying Levels of Fluoride in Drinking Water." <http://www.uct.ac.za/depts/geolsci/grads/contents.html>.

McCaffrey, L. P.(1998). "Distribution and causes of high fluoride groundwater in the western Bushveld area of South Africa":1-189. Ph.D. thesis: University of Cape Town; <http://www.uct.ac.za/depts/geolsci/grads/contents.html>.

Meyer, J. A.; Casey, N.H. ; Coetzee, C.B. (2002). "A New Approach to define the Target Water Quality Range for Fluoride in the Drinking Water for Livestock."
<http://www.uct.ac.za/depts/geosci/grads/contents.html>.

Schoeman, J. J.; Lebone, M.L. (2002)."Water Defluoridation."
<http://www.uct.ac.za/depts/geosci/grads/contents.html>.

Travi, Y. (1993) Hydrologie et Hydrochimie des aquifères du Sénégal; Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines. *Sciences Géologiques, Mémoire 95*, 29-32, Strasbourg, Université Louis Pasteur et CNRS.

III) Les sources de fluor

Les recherches effectuées ont permis d'identifier une grande diversité, naturelle ou anthropique, des sources possibles de fluor, mais également des processus chimiques et hydrologiques impliqués dans la présence de fluor dans l'eau souterraine.

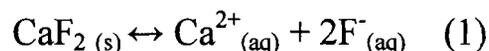
A) Les sources naturelles

Les sources naturelles à l'origine du contenu en fluor des eaux souterraines les plus couramment constatées sont :

- la nature des roches de l'aquifère
- le temps de contact entre l'eau et les minéraux fluorés
- le contrôle chimique des eaux

Le fluor est le treizième élément en abondance de la croûte terrestre (Taylor, 1964). D'un point de vue géologique, comme le montre la comparaison entre les carte 1 et 2, les eaux riches en fluor peuvent se rencontrer dans les trois grands types de terrain que sont les bassins sédimentaires, les zones de socle cristallins et les régions volcaniques. Dans le premier cas, illustré par les exemples de la ceinture partant de la Turquie vers l'Asie et le nord de l'Afrique (Algérie, Tunisie, Maroc), l'origine du fluor provient du fait que, excepté pour les évaporites, le fluor est l'halogène le plus abondant des roches sédimentaires (Wedepohl, 1974). La fluorite, l'apatite ou fluoapatite des bassins phosphatés et les micas sont les principaux minéraux fluorés de ces roches (Koritnig, 1963). Dans le second cas, la région la plus connue et la mieux documentée est le Rift Est-Africain, où des teneurs allant jusqu'à 180 mg/l ont pu être observées dans des lacs au Kenya (Gaciri et Davies, 1993). L'origine du fluor vient alors soit du lessivage des roches magmatiques alcalines possédant des minéraux tels que l'apatite, le topaze ou la fluorine soit de l'activité volcanique elle-même engendrant des apports gazeux fluorés tel que HF (Chernet et al, 2001). Enfin, des exemples d'eaux souterraines dépassant largement la teneur en fluor recommandée par l'OMS (<1.5mg/l) et provenant d'aquifères granitiques ont été localisés en Inde, en Thaïlande, en Chine, en Afrique du sud et dans la partie Est du Sénégal. Mais les réservoirs granitiques, bien que potentiellement les plus aptes à fournir du fluor, n'en libèrent dans leur grande majorité qu'une faible partie dans les eaux souterraines. Ceci correspondant au fait qu'en tant qu'élément majeur le fluor de ces roches est difficilement mobilisable à basse température (Travi, 1993).

Par rapport au contrôle chimique, la concentration en fluor dans les eaux dépend essentiellement de l'état de saturation vis à vis de la fluorine (CaF₂). Si l'eau est sous-saturée, la teneur en fluor est généralement le reflet de la quantité disponible au sein de la roche lessivée. Par contre, dans le cas d'une eau saturée, la concentration de fluor est alors limitée par la valeur de la constante de solubilité K_s de la réaction de dissolution de la fluorine:



$$K_s = (\text{Ca}^{2+})(\text{F}^-)^2$$

$K_s = 10^{-10,57}$ à 25°C (Smyshlyaev et Edeleva, 1962)

La comparaison des teneurs en fluor obtenues par Travi (1993) dans les aquifères Sénégalais et Tunisiens illustre clairement ce rôle joué par la constante de solubilité de la réaction (1). En effet, bien que situés tous les deux dans des formations sédimentaires phosphatés et présentant tous les deux des eaux saturées par rapport à la fluorine, les concentrations mesurées au Sénégal peuvent s'élever jusqu'à 13 mg/l tandis que celles obtenues en Tunisie ne dépassent que rarement les 2 mg/l. La cause d'une telle différence vient de la présence, dans le cas de la

Tunisie de roches tel que le gypse (CaSO_4) engendrant un apport et une concentration non-négligeable de calcium dans les eaux souterraines limitant ainsi les teneurs en fluor beaucoup plus tôt qu'au Sénégal.

Les fortes teneurs de fluor semblent donc associées le plus souvent à des eaux souterraines, possédant de fortes valeurs de pH (>7) facilitant ainsi les échanges ioniques entre fluorures F^- et groupements hydroxyles OH^- , et de type bicarbonaté-sodique ($\text{Na}^+, \text{HCO}_3^-$) caractérisées par des faibles concentrations en magnésium et en calcium en raison de la faible solubilité de la fluorine.

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

B) Les sources anthropiques

L'apport en fluor dans les eaux souterraines peut également provenir d'activités anthropiques.

L'utilisation agricole intensive d'engrais phosphatés (fluorapatite), d'insecticides ou d'herbicides contenant des fluorures en tant que constituant essentiel ou sous forme d'impuretés (cryolite, fluorosilicate de baryum) induit généralement une pollution des nappes phréatiques aux alentours des sols ayant subi un tel traitement. L'importance de la contamination due aux engrais phosphatés a été mise en évidence par Rao N.S (1997) à travers une étude menée en Inde sur la contribution relative de la géologie et des engrais.

Les industries de l'acier, de l'aluminium, du verre, et de fabrication de briques et de tuiles représentent également une source potentielle de contamination en fluor du milieu. De plus, l'apport peut ici provenir de deux sortes de rejets. D'une part, les évacuations d'eaux usées (Coker et Davis, 1981) et d'autre part les émissions gazeuses de composés tels que HF ou SiF_4 qui peuvent par la suite se solubiliser au contact d'un milieu aqueux et intégrer ainsi le cycle de l'eau.

Les eaux de l'aquifère « Spokane », dans l'état de Washington, aux USA, où des teneurs élevées de fluor ont pu être constatées, notamment dans les puits situés aux alentours du site industriel, illustre parfaitement le cas d'une contamination en fluor provenant de la présence d'usine de traitement d'aluminium (Burkhalter et al, 1984).

IV) Etude de cas

(Analyses des teneurs en fluor des eaux souterraines d'une partie de l'Altiplano andin)

Afin de pouvoir approfondir nos connaissances géochimiques vis-à-vis du fluor dans les eaux souterraines (teneur et spéciation), mais aussi d'appréhender éventuellement le problème dans une région où la ressource souterraine en eau est déjà touchée par une forte salinité, nous avons analysé 15 échantillons provenant de l'Altiplano andin dans le laboratoire de la Maison de l'Eau (teneur totale en fluor et dosages des ions majeurs).

De plus, l'existence préalable d'une étude hydroclimatique (Coudrain et al, 2002) intégrant un travail sur la salinité par rapport aux chlorures et la disponibilité immédiate des échantillons nous encourageaient dans le choix de cette région.

A) Localisation de la zone d'étude

La carte 4 (Annexe 4) permet de localiser, en Amérique du Sud, la zone de l'Altiplano andin ayant servi de zone d'étude, ainsi que les différents sites d'échantillonnage des eaux souterraines (points vert sur la carte) recueillies pour l'analyse.

Dans le but de pouvoir les resituer dans un contexte hydrologique plus général, les résultats seront comparés à ceux obtenus dans des eaux de surface caractéristiques des conditions hydrologiques locales (Lac Titicaca, avant et après la confluence du Rio Desaguadero et du Rio Mauri...).

Ces échantillons de surface sont identifiés en rouge sur la carte 4 (Annexe 4)

B) Matériels & Méthodes

1) Dosage du fluor

L'analyse du fluor dans les échantillons d'eau est réalisée par potentiométrie (mesure de l'activité d'un élément) avec une électrode sélective de type ISE25F (Radiometer Analytical S.A) et une électrode de référence Ag/AgCl saturée en calomel. Cette méthode, dont c'est la première mise au point au laboratoire de la MSE permet de mesurer l'activité en fluor pour des solutions où les concentrations en fluor sont inférieures à 0,4 mg/l (limite de détection des analyses en fluor reçu de l'IRD). Le montage conçu pour l'expérience est présenté en annexe 5.

- Préparation de la gamme étalon

Afin de pouvoir corréliser les valeurs de potentiel obtenues lors de l'analyse en fluor des échantillons de l'Altiplano, avec des potentiels de solutions de concentrations en fluor connues, une gamme étalon est établie à partir d'une solution mère Merk Titrisol de 1000 mg/l de fluor et d'un décomplexant d'ion fluorure (TAFIC), selon le protocole suivant:

Concentration en fluorure de l'étalon (mg/l)	Quantité de TAFIC (ml)	Quantité de solution mère (ml)	Quantité d'eau milliQ (ml)	Total (ml)
1	5	0,050	44,95	50
2	5	0,100	44,90	50
5	5	0,250	44,75	50
20	5	1,0	44	50
50	5	2,5	42,5	50

Un autre étalon de 0,1 mg/l de fluor est préparé en deux étapes:

- 0,5 ml de solution mère dans 49,5 ml d'eau milliQ (millipore), donnant ainsi une solution A à 10 mg/l
- puis 0,5 ml de cette solution A avec 44,5 ml d'eau milliQ (millipore) et 5 ml de TAFIC.

- Préparation des échantillons

Pour pouvoir comparer avec la gamme étalon et dans les mêmes conditions, les valeurs de potentiel mesurées et les activités en fluor correspondantes, les échantillons d'eaux souterraines nécessitent une préparation préalable.

Pour cela, les volumes dosés sont ajustés à 50 ml avec 45ml d'eau provenant des puits et 5ml de décomplexant (TAFIC). Cette opération permet à la fois d'obtenir les mêmes volumes que ceux de la gamme étalon, de dissocier tous les composés fluorés présent dans la solution et de mettre ainsi tout le fluor sous forme ionique F^- . La mesure potentiométrique permet ainsi d'obtenir la valeur de la concentration totale du fluor contenu dans l'échantillon.

2) Dosage des ions majeurs

L'analyse des ions majeurs est réalisée par électrophorèse capillaire (Quant 4000E, Waters).

- Principe de fonctionnement de l'électrophorèse capillaire (Figure 1)

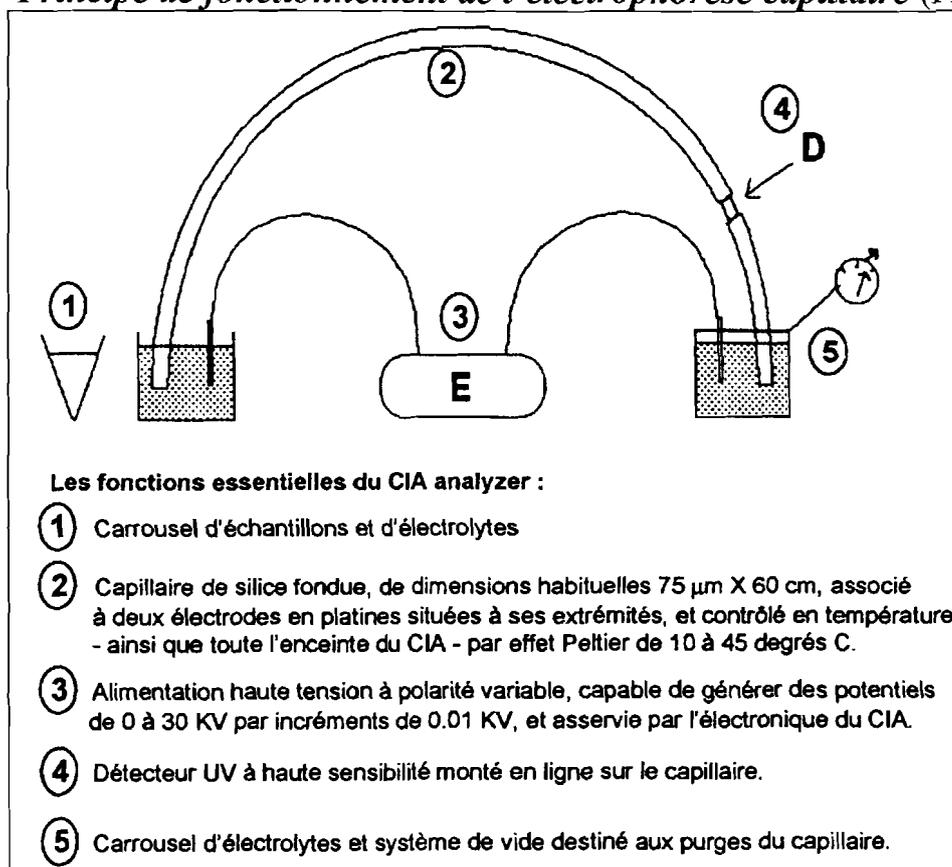


Figure 1 Schéma de fonctionnement

La technique utilisée est la séparation ionique basée sur la différence de mobilité qui distingue les ions. Plus celui-ci est petit et chargé, plus il est mobile et migrera rapidement. Le temps mis pour parcourir la distance entre l'échantillon et la photodiode, placée sur le capillaire et permettant de quantifier le flux, sert alors à déterminer le type d'ion présent.

Les anions et les cations sont analysés séparément.

Le tube de faible diamètre (capillaire) est tout d'abord rempli avec un tampon appelé *électrolyte*. L'échantillon à analyser est ensuite injecté à une extrémité du capillaire.

Une différence de potentiel de 20 KV est alors imposée entre les deux extrémités du capillaire. Sous l'effet du champ électrique induit, les différents ions contenus dans l'échantillon vont migrer vers l'extrémité du capillaire correspondant à la charge opposée (cathode pour les anions et anode pour les cations).

- Préparation des échantillons

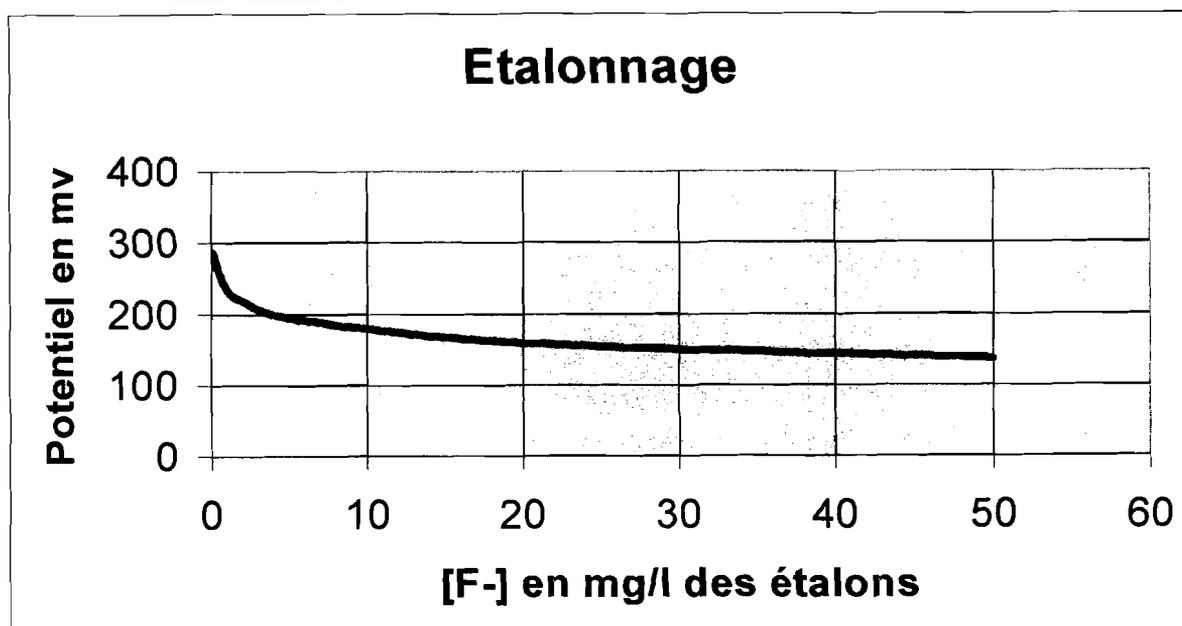
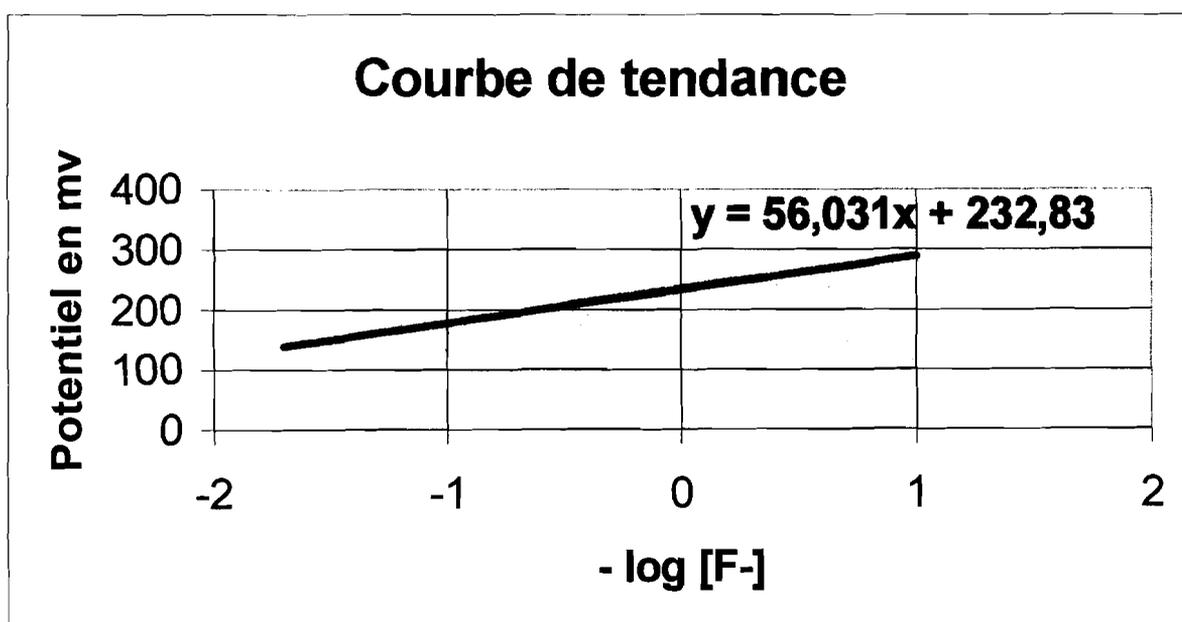
Environ 10 ml de chaque échantillon d'eau à analyser, sont prélevés à l'aide d'une seringue, puis filtrés à 0,45 µm. Deux séries sont ainsi réalisées, l'une pour les anions, l'autre pour les cations. Pour ces derniers, le milieu est acidifié à 1‰ avec 10µl d'acide nitrique HNO₃ ultrapur afin d'éviter leur précipitation ou leur adsorption sur les parois des tubes et de faciliter leur séparation.

C) Résultats

1) Etalonnage de l'électrode sélective

Concentration en fluorures des étalons (mg/l)	Potentiel mesuré (mV)	-Log [F ⁻]
0,1	286,1	1,00
1	235,1	0,00
2	218,3	-0,30
5	194,5	-0,70
20	158,7	-1,30
50	136,2	-1,70

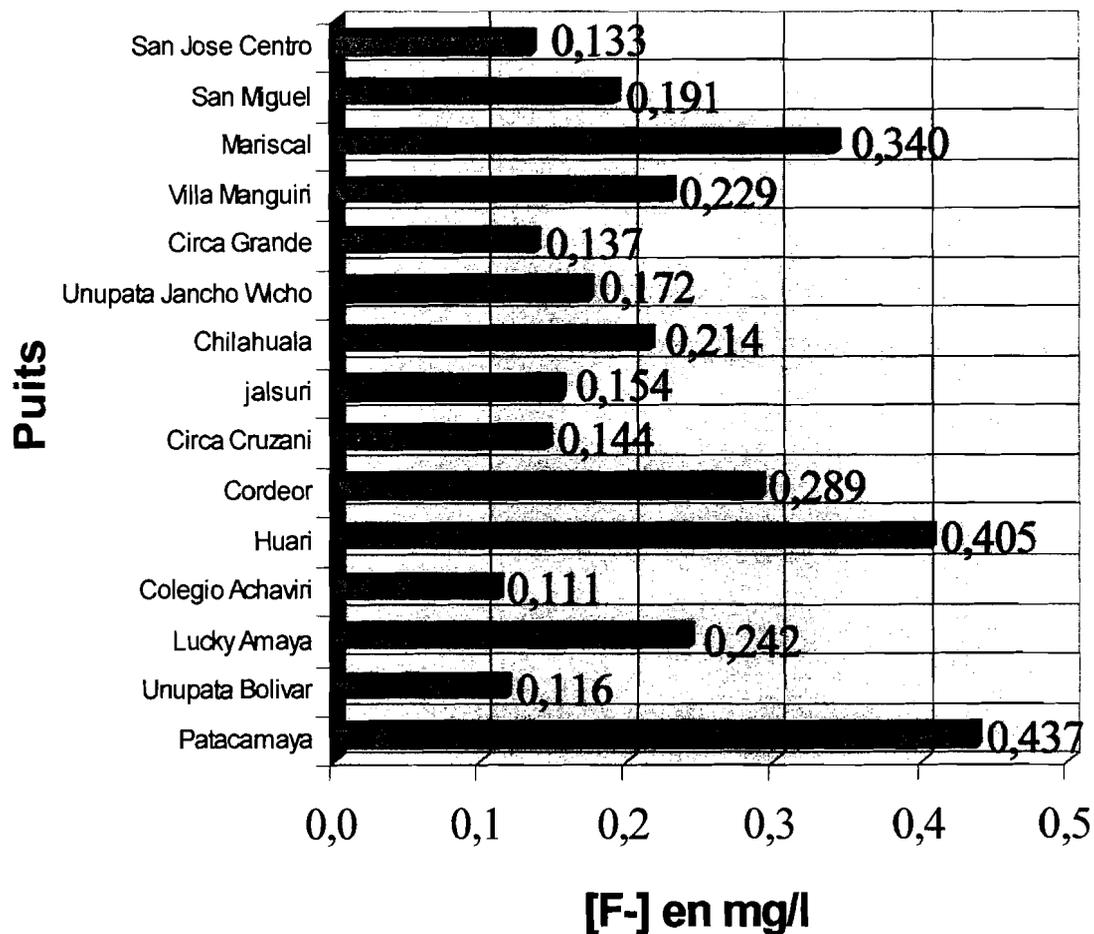
Tableau 1 Valeurs des potentiels obtenus lors de l'étalonnage de l'électrode



2) Dosage du fluor

Puits	Concentration totale en fluorures (mg/l)	Potentiel mesuré (mV)	- log [F-]
Colegio Achaviri	0,111	286,3	0,954
Unupata Bolivar	0,116	285,2	0,935
San Jose Centro	0,133	286,2	0,87
Circa Grande	0,137	285,6	0,86
Circa Cruzani	0,144	280	0,842
jalsuri	0,154	282,7	0,81
Unupata Jancho Wicho	0,172	280	0,76
San Miguel	0,191	277,5	0,72
Chilahuala	0,214	274,7	0,67
Villa Manguiri	0,229	273,1	0,64
Lucky Amaya	0,242	267,4	0,617
Cordeor	0,289	263	0,538
Mariscal	0,340	263,5	0,47
Huari	0,405	254,8	0,392
Patacamaya	0,437	253	0,360

Tableau 2 Potentiels mesurés et teneurs en fluor correspondantes des échantillons d'eaux souterraines analysées



Les résultats de l'analyse montrent des concentrations comprises entre 0,111 et 0,437 mg/l (Tableau 2).

Les valeurs les plus élevées (0,437 et 0,405 mg/l) proviennent respectivement des puits de Patacamaya et Huari.

Les plus faibles s'observent dans les puits du Colegio Achaviri (0,111mg/l), Unupata Bolivar (0,116mg/l), San Jose Centro (0,133mg/l) et Circa Grande (0,137mg/l).

3) Dosage des ions majeurs

Les concentrations mesurées lors de l'analyse en ions majeurs sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous :

Puits	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	Na	K	Cond.
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μS/cm
Patacamaya	88,1	8,0	32,1	14,1	6,5	104,6	7,4	594
Unupata Bolivar	641,3	51,7	346,5	164,9	30,3	495,8	19,3	3280
Lucky Amaya	560,1	48,8	312,7	128,5	37,2	460,5	16,6	2890
Colegio Achaviri	18,9	19,1	232,5	78,8	12,1	95,7	18,2	890
Huari	30,8	15,1	103,8	49,9	13,1	65,7	7,2	623
Cordeor	328,1	53,2	180,9	50,1	9,5	384,7	16,5	1890
Circa Cruzani	1173,4		297,0	173,2	59,7	887,9	24,2	5060
jalsuri	16,3	8,3	32,3	47,9	3,7	11,7	3,2	318
Chilahuala	82,8	11,9	14,3	96,8	17,5	256,8	12,3	1840
Unupata Jancho Wicho	726,0	44,9	335,6	159,5	39,3	538,1	24,1	3510
Circa Grande	1140,4	113,9	402,9	217,3	65,8	839,1	25,2	5000
Villa Manguiri	2,4	11,1	154,6	85,5	11,4	38,5	6,6	600
Mariscal	14,3	9,5	120,1	54,6	6,5	87,1	5,1	659
San Miguel	664,2	53,2	283,1	113,5	30,3	547,1	16,8	3280
San Jose Centro	39,5	10,8	126,9	81,6	7,7	40,7	5,1	620

Tableau 3 Concentrations en ions majeurs obtenues dans les eaux souterraines analysées

4) Spéciation du fluor

L'étude de la spéciation chimique d'un élément permet de connaître les différentes formes et composés (libre, complexé...) sous lesquels il se trouve dans la solution.

La spéciation du fluor dans les eaux souterraines de l'Altiplano est ici réalisée par l'utilisation du logiciel de thermodynamique chimique MineQI⁺.

Les résultats obtenus montrent que ces eaux sont sous-saturées par rapport à la fluorine. Ce minéral n'est donc pas susceptible, dans notre cas, de contrôler la valeur de la concentration en fluor.

On observe une nette prédominance, dans la totalité des échantillons, de la forme ionique F⁻ dissoute libre qui représente de l'ordre de 95% de l'ensemble des espèces fluorées présentes en solution. On remarque également que MgF⁺ et CaF⁺ (Figure 2) sont des composés non-négligeables.

L'étude plus en détail du puit de Huari, dont la concentration totale en fluor est l'une des plus importantes de nos échantillons, avec 0,405 mg/l, permet alors de vérifier les résultats énoncés précédemment avec cependant la présence en plus du composé NaF (Figure 3).

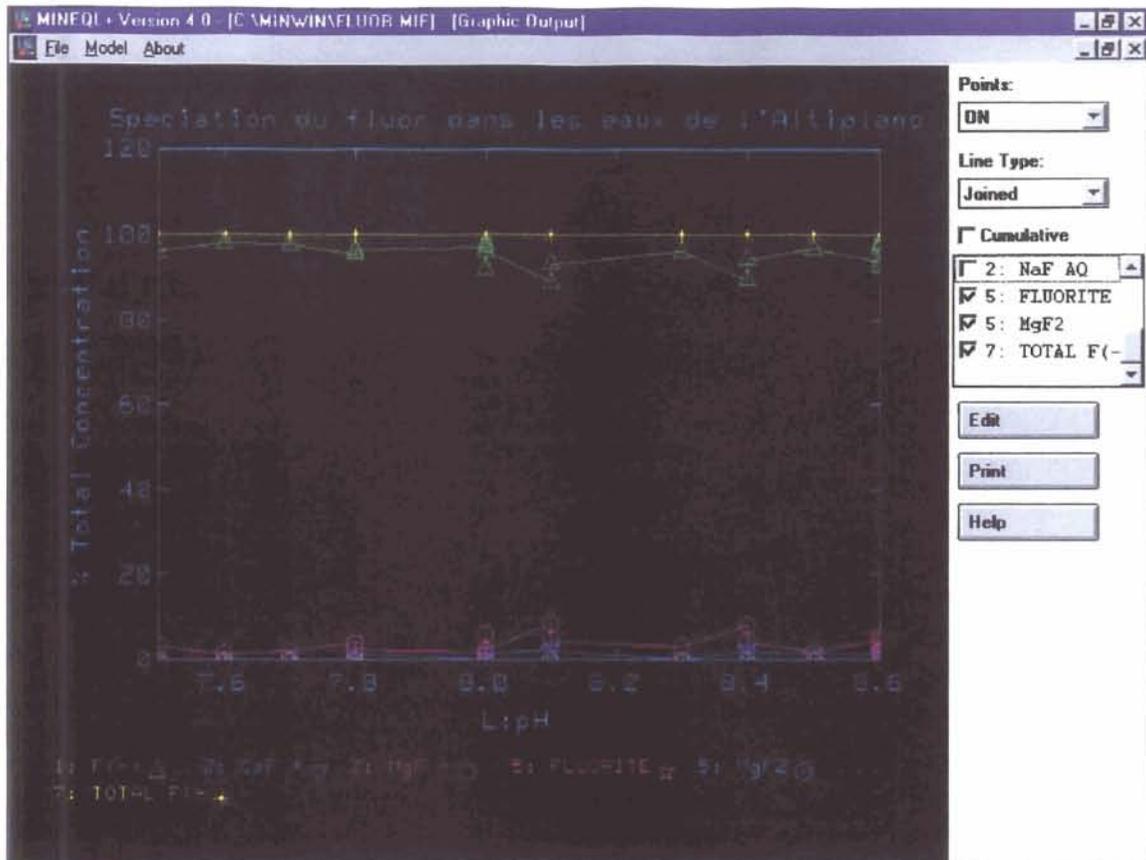


Figure 2 Interface graphique du logiciel MineQL+. La spéciation chimique (en %) du fluor dans les eaux de l'Altiplano montre la prédominance de la forme ionique F^- dissoute libre (en vert) par rapport à la totalité des espèces fluorées (en jaune).

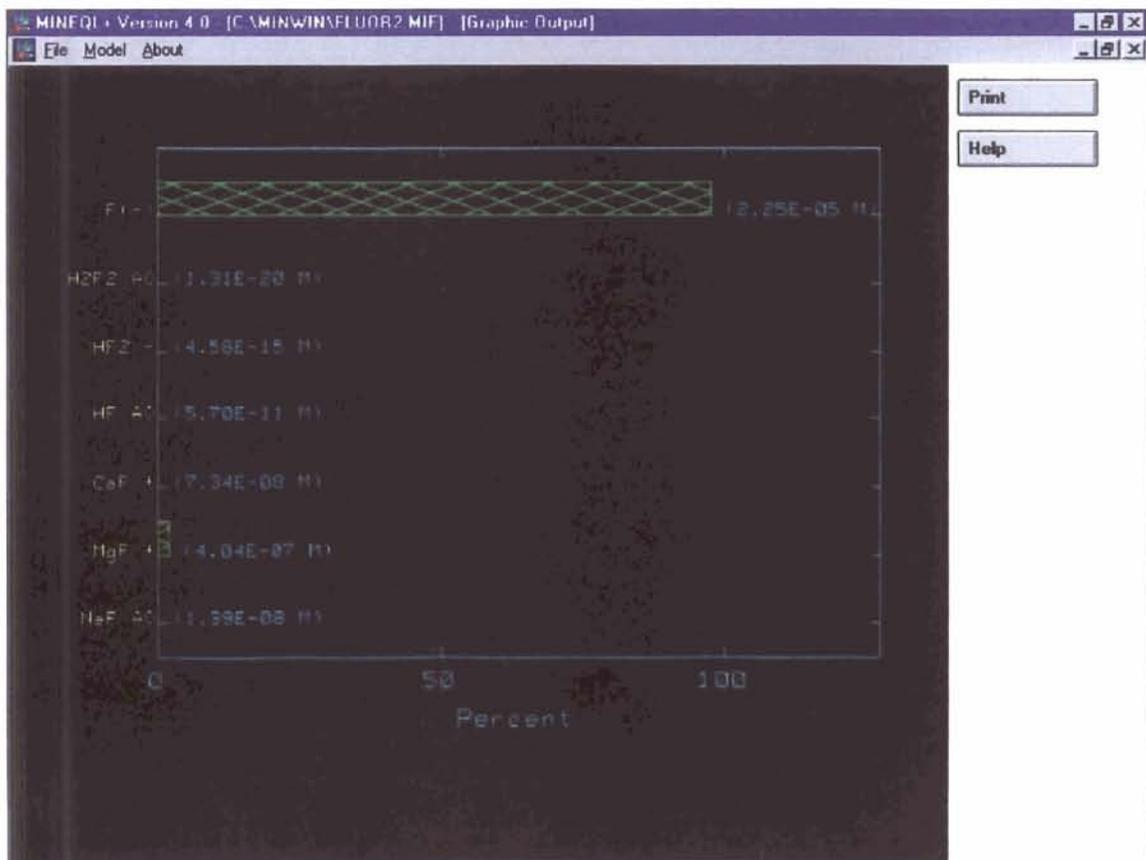


Figure 3 Résultat graphique du logiciel MineQL+ pour la spéciation du fluor dans l'échantillon d'eau du puit de Huari (point C sur la carte 4, annexe 4)

D) Interprétations et discussions

Les résultats obtenus, sur les échantillons prélevés sur l'Altiplano en 1995 et analysés en 2002 à la MSE, sont dans un premier temps comparés aux valeurs d'analyses précédemment effectuées sur des échantillons issus des mêmes puits mais prélevés en 1998 et analysés en 1998 par l'IRD à Bondy.

L'ordre de grandeur des concentrations mesurées étant généralement identique (Figure 4 ci-dessous et Tableau annexe 6), les nouvelles données acquises sont considérées comme valables.

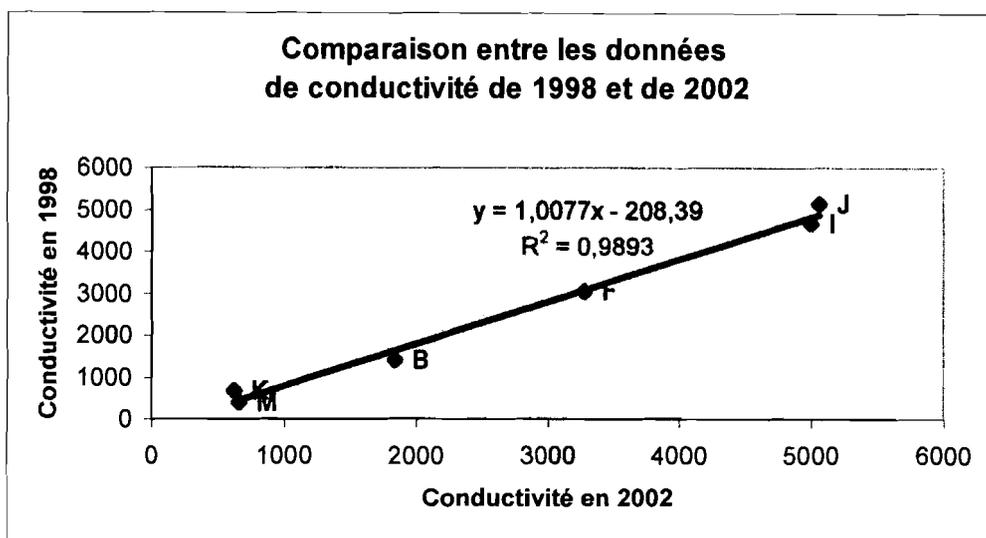


Figure 4 Comparaison entre les conductivités mesurées, en 1998 par l'IRD et en 2002 à la MSE, dans les échantillons d'eaux souterraines provenant des même puits de l'altiplano. Ce graphique permet de visualiser la concordance des teneurs en minéralisation totale obtenues lors de ces deux analyses et de valider ainsi les résultats de nos dosages.

Aspect médical

En ce qui concerne le fluor, les concentrations mesurées ne posent a priori pas de problème direct de santé quant à la consommation de ces eaux souterraines, puisqu'elles se situent toutes en dessous de la norme de potabilité de 0,8 mg/l fixée par l'OMS pour les régions chaudes.

Certains puits, tels que Patacamaya, Huari et Mariscal, présentent même des teneurs de l'ordre de 0,4 mg/l susceptibles de prévenir et réduire l'apparition de carie dentaire. En effet, si l'on prend en compte la très forte consommation d'eau liée au climat aride de cette région, ces concentrations peuvent induire un apport journalier en fluor (2,4 mg/jour pour 6 litres d'eau consommés quotidiennement) non-négligeable. De plus, les calculs de spéciation effectués sur ces eaux montrent que le fluor n'est qu'à 95% sous forme d'ion fluorure, et non à 98% comme cela est souvent constaté (Travi, 1993). Or l'ion fluorure étant la forme toxique (Oliviera et al., 1978), ce pourcentage un peu plus faible est un avantage pour l'utilisation de ces eaux comme eaux de boisson.

Aspect hydrologique

La comparaison des concentrations en fluor obtenues dans les échantillons d'eaux souterraines analysées à la MSE avec les teneurs des eaux de surface de la zone d'étude (Tableau annexe 6) analysées au laboratoire de géochimie de la surface à Strasbourg par Mr. Risacher, permet tout d'abord de localiser un stock important de fluor : le lac Titicaca.

En effet, avec une teneur de 0,475 mg/l, valeur la plus élevée de cette région, ce lac représente une grande quantité de fluor disponible et pouvant être drainé vers l'aval par le Rio Desaguadero. Cependant, celui-ci ne peut-être considéré comme la source principale de fluor puisque les teneurs des précipitations sont insuffisantes (Gaciri et Davies, 1993) pour générer une telle quantité. L'origine du fluor se situe dans la nature des roches lessivées, au niveau des reliefs, par les eaux souterraines alimentant le lac et dont les phénomènes d'évaporation dans cette région aride peuvent augmenter les concentrations.

Les valeurs obtenues plus en aval sur cette rivière, aux points Q et S (0,38 mg/l et 0,27 mg/l) localisés sur la carte 4 en annexe 4 et respectivement avant et après la confluence avec le Rio Mauri (0,29 mg/l) montrent la dilution provoquée par l'apport d'eaux de plus faibles concentrations.

L'analyse des données en conductivité, en chlorure et en fluor mesurées dans les puits, permet d'autre part de resituer et de confirmer le contexte hydrologique général déjà énoncé par Coudrain et al (2002) pour cette région. En effet, d'après les résultats, plusieurs groupes d'eaux souterraines se distinguent de part leurs caractéristiques chimiques.

Un premier groupe constitué par les puits D et F se situe le long du Rio Desaguadero, un second localisé plus à l'ouest sur la rive droite et regroupant les points d'eau B,C,L,M,N et K, enfin un troisième composé par les puits G,H,I et J.

Le premier correspond à des eaux souterraines essentiellement sous l'influence du Rio Desaguadero, puisqu'on retrouve une conductivité comprise entre 600 et 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, une concentration en chlorures en dessous de 600 mg/l et des teneurs en fluor entre 0,2 et 0,5 mg/l caractéristiques des eaux du Rio (Tableau annexe 6).

Pour le second, l'eau souterraine provient des eaux de ruissellement infiltrées dans les piedmonts délimitant la frontière ouest de notre zone d'étude. Les teneurs en chlorures sont généralement inférieures à 20 mg/l (Tableau annexe 6). Les valeurs de fluor proviennent du lessivage des roches sédimentaires tertiaires des piedmonts (0,1 à 0,34 mg/l).

Enfin, les puits G ,H,I et J qui ont des caractéristiques chimiques tout à fait particulières.

Les concentrations en chlorures sont très fortes, de l'ordre de 1000 mg/l, et la conductivité atteint 5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour le puit de « Circa Cruzani ». Ces eaux souterraines sont situées dans la zone de confluence des deux types d'alimentation de la nappe d'eau souterraine (Rio Desaguadero et infiltrations depuis les reliefs). Cependant leur marquage géochimique ne correspond pas à des concentrations intermédiaires entre celles de ces deux influences. Pour rendre compte de ces fortes concentrations, les données et modélisations présentées par Coudrain et al (2002) montrent qu'il faut tenir compte de l'évolution hydroclimatique depuis 15000 ans et notamment du rôle joué par un lac salé (de l'ordre de 400 méq/l) ayant recouvert une grande partie du bassin sud de l'Altiplano et qui constitue une troisième source d'alimentation de l'eau souterraine située dans la zone de ces puits.

Cette étude a ainsi permis de mettre en évidence le rôle important, après le retrait du lac, de l'accumulation dans la zone non-saturée des sels initialement présents dans l'aquifère. Les périodes de fortes précipitations, il y a environ 2000 ans, ont ensuite permis le retour de ces sels en solution depuis la zone non-saturée vers l'aquifère où les puits G,H,I et J se situent.

La comparaison entre concentrations en fluorures et concentrations en chlorures dans les eaux souterraines et de surface de l'Altiplano (Figures 5) permet tout d'abord de visualiser ces résultats. On retrouve effectivement deux familles clairement définies (les eaux salées des puits G,H,I et J, et celles moins chargées en chlorures L,M,N et K provenant des infiltrations

des piedmonts) ainsi qu'un groupe intermédiaire illustré par les points D et F qui correspond à la zone d'alimentation par le Rio Desaguadero.

D'autre part, on observe dans les eaux attestant la présence de chlorures, une nette anticorrelation entre ces derniers et les concentrations en fluor. A cela, les différentes origines des eaux souterraines semblent être l'explication la plus cohérente. Le rapport entre concentrations en calcium et en fluorures (Figure 6) apporte une confirmation supplémentaire. On remarque une corrélation négative des valeurs de calcium et de fluor. Cependant, ceci est un peu surprenant pour des eaux non-saturées en fluorine.

Ces nouvelles données chimiques, associées aux résultats de travaux chimiques et hydrologiques précédents (Risacher et Fritz, 2000; Coudrain et al, 2002) permettent d'émettre les hypothèses suivantes sur la composition de l'eau du paléolac: ses concentrations en chlorure, en strontium et en calcium devaient être plus élevées que celles des deux autres eaux alimentant l'aquifère et la concentration en fluor était au contraire vraisemblablement plus faible.

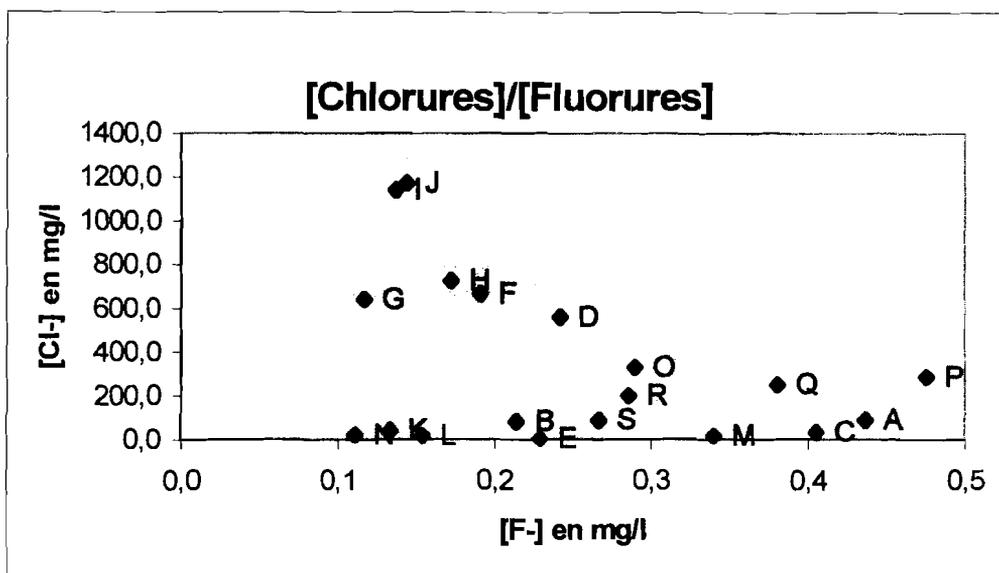


Figure 5 Rapport entre les concentrations en fluorures et en chlorures dans les eaux souterraines et de surfaces de l'Altiplano

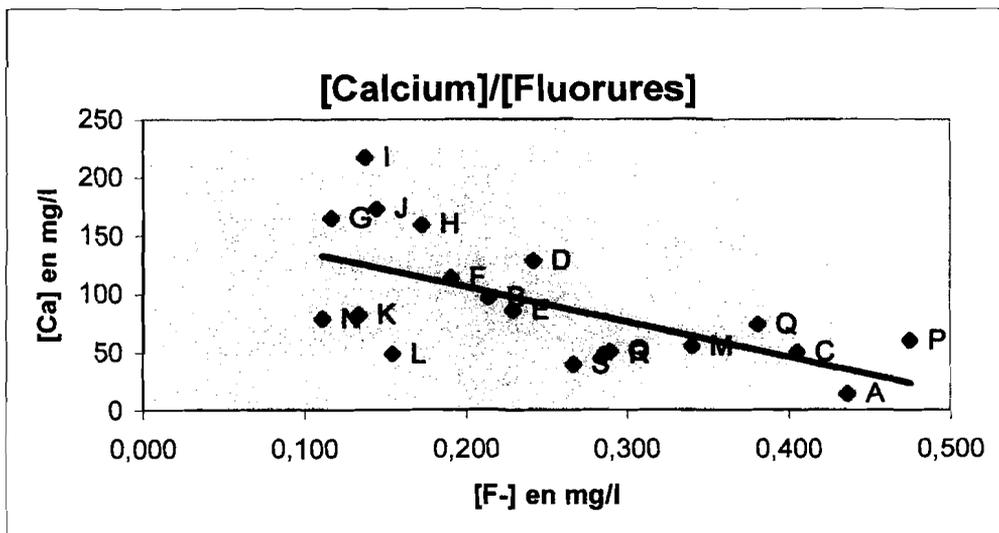


Figure 6 Rapport entre les concentrations en fluorures et en calcium dans les eaux souterraines et de surfaces de l'Altiplano

E) Conclusion

Les analyses chimiques effectuées sur les échantillons d'eaux souterraines provenant de l'Altiplano nous ont donc permis d'obtenir les résultats suivants :

- Mise au point pour la première fois au laboratoire de la MSE d'un protocole de dosage du fluor contenu dans les eaux.
- Appréhension sur l'Altiplano andin d'un éventuel problème de santé lié à la consommation d'eaux riches en fluor, risque inexistant dans l'immédiat mais dont le principe de précaution ne saurait que recommander la surveillance.
- Spéciation du fluor dans des eaux souterraines sous-saturées par rapport à la fluorine CaF_2 (95% sous forme d'ion fluorure dissout et libre, 5% sous forme de CaF^+ et de MgF^+).
- Identification des processus principaux à l'origine du contenu en fluor des eaux souterraines, pour cette même région, comme étant le lessivage des roches présentent dans les reliefs et le drainage par le Rio Desaguadero de la quantité disponible dans le lac Titicaca.
- Reconstitution d'un contexte hydrologique général (origine des eaux et marquage chimique d'une évolution hydroclimatique).

V) Les différentes méthodes de remédiation

Un grand nombre de techniques, permettant de réduire les fortes teneurs en fluor dans les eaux de consommation, ont été développées. Le choix se fait généralement en fonction du coût de l'opération, des caractéristiques chimiques de l'eau ou encore des infrastructures disponibles.

Les techniques de remédiation les plus fréquemment employées et décrites par Pontié et al (1996) sont de deux types: physico-chimique ou physique. Mais à ceux-là, peuvent s'ajouter également des "astuces" hydrologiques et domestiques permettant de réduire les risques lors de la consommation de ces eaux.

A) Les techniques de défluoruration

1) Les procédés physico-chimiques

- *Echanges d'ions / Adsorption*

(phosphate tricalcique, alumine activée, charbon actif)

Ce procédé est réalisé grâce à des résines ioniques ayant une affinité pour l'ion fluorure. Les principaux désavantages de cette technique sont généralement la faible spécificité des résines (les ions OH^- et SO_4^{2-} se fixent plus facilement) et le coût de régénération des résines.

- *Précipitation*

Cette technique est basée sur la formation de composés insolubles à partir des ions fluorures présents dans l'eau à traiter. Une étape de décantation après coagulation est cependant nécessaire afin d'éliminer physiquement les composés fluorés formés. Les sels les plus utilisés sont ceux d'aluminium et de calcium étant donné leur faible solubilité une fois complexés avec les fluorures.

2) Les procédés physiques (ou techniques à membranes)

- *Electrodialyse*

C'est un procédé de séparation mettant en œuvre un champ électrique. Les espèces à extraire sont séparées de la solution à épurer par migration sélective des ions à travers des membranes à perméabilité sélective (membranes échangeuses d'anions, perméables aux anions, ou membranes échangeuses de cations, perméables aux cations), comme illustré par le schéma ci-dessous (Figure 7):

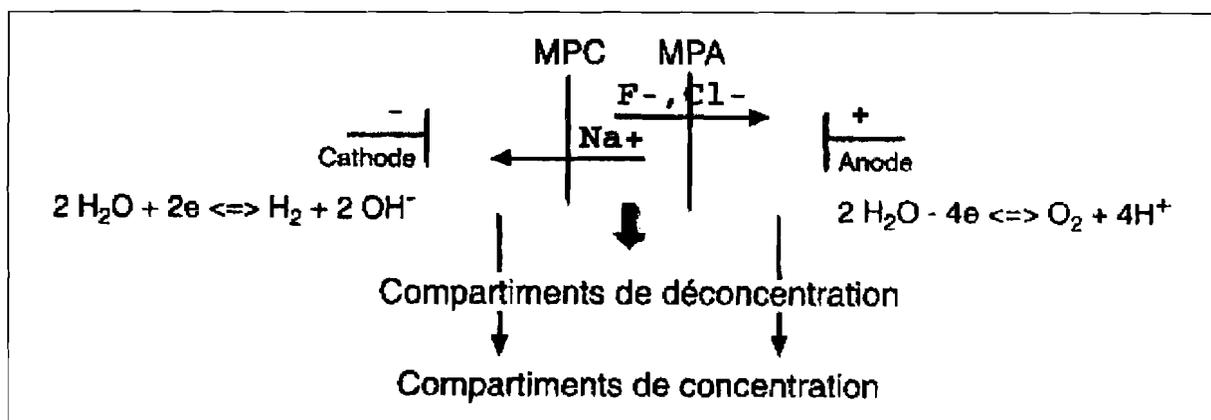


Figure 7 Schéma d'une cellule d'électrodialyse simple. (MPC = membrane perméable aux cations; MPA = membrane perméable aux anions)

- *Osmose inverse*

L'osmose, phénomène important dans la nature et connu depuis le XVIII^e siècle, n'a vu des applications, par l'osmose inverse, que dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

Le principe de l'osmose est le suivant : si d'un côté d'une membrane d'osmose (semi-perméable), on a une solution concentrée et de l'autre une eau pure ou une solution diluée, la pression osmotique de l'eau pure permet à celle-ci de traverser seule la membrane et d'aller diluer la solution la plus concentrée, rééquilibrant ainsi la différence de potentiel chimique initiale due à la différence de concentration.

Le principe de l'osmose inverse consiste à appliquer, du côté du compartiment le plus concentré, une pression hydrostatique (>30 bars) supérieure à la pression osmotique de l'eau. En inversant ainsi le phénomène d'osmose, on fait passer l'eau pure depuis le milieu concentré vers le milieu dilué.

Bien que possédant des taux de rétention très élevés, sa faible spécificité et sa forte consommation d'énergie rendent cette technique difficilement accessible aux pays en voie de développement, souvent les plus concernés.

- *Nanofiltration (osmose inverse à basse pression)*

L'apparition de membranes sélectives pour les sels minéraux a permis de développer le traitement des eaux peu minéralisées à des faibles pressions (<20 bars). Ainsi, bien que le principe de cette méthode soit le même que celui de l'osmose inverse, le coût énergétique de la séparation diminue à 0,5-2 kWh/m³, ce qui représente cinq fois moins que la méthode précédente. De plus, l'étape de reminéralisation est simplifiée, et celles de maintenance et d'entretien sont assez réduites.

La plupart du temps toutes ces techniques permettant d'éliminer l'excès en fluor contenu dans les eaux posent cependant des problèmes pour les personnes intéressées, soit liés à la mise en place des infrastructures, soit aux connaissances technologiques permettant la maintenance, soit enfin vis-à-vis des coûts supplémentaires engendrés par la consommation énergétique, la régénération des membranes ou l'approvisionnement en produits chimiques. A cela s'ajoute également la quantité de déchet générée par de telles méthodes et nécessitant une étape ultérieure de traitement afin d'éviter les rejets d'effluents contaminés susceptibles de réintégrer la ressource en eau.

Ainsi, la nanofiltration, limitée cependant d'un point de vue rendement pour les eaux fortement minéralisées, semble correspondre au meilleur compromis entre efficacité, coût, maintenance et simplicité d'utilisation.

B) Conseils et remarques d'usage

1) Hydrologique

Le mélange, avant la distribution pour la consommation, des eaux souterraines riches en fluor avec des eaux souterraines ou de surfaces dont la teneur en fluor est plus faible, permet de créer ainsi un effet de dilution des concentrations des eaux d'origine jusqu'aux normes de potabilité.

2) Domestique

Bouillir l'eau dont les teneurs en fluor sont supérieures ou proches des normes de potabilités, peut entraîner un accroissement du risque car l'évaporation de l'eau augmente les concentrations.

Conclusion

La présence de concentration en fluor supérieure à 1,5 mg/l (norme OMS) dans les eaux souterraines est localement très fréquente. En Europe et en Amérique du Nord, ces eaux sont traitées avant leur distribution. Dans de nombreuses régions du monde, les conditions socio-économiques ne permettent pas de mettre en place ces traitements. En comparant l'étude de synthèse de l'UNICEF, basée sur des documents publiés jusqu'en 1998, à notre analyse ce stage permet de constater l'ampleur croissante ces dernières années du problème de santé lié à la consommation d'eaux souterraines riches en fluor, avec au minimum une trentaine de pays concernés actuellement.

La création sur ce thème du site web, organisé sous forme de base de données grâce aux nombreuses références trouvées, permet, outre une meilleure accessibilité à l'information, une réactualisation permanente et un suivi nécessaire du phénomène.

Bien que l'apport anthropique au cycle de l'eau de cet élément ne soit pas négligeable, la localisation des populations touchées de façon endémique par la fluorose dentaire reflète généralement un environnement géologique particulier (bassin sédimentaire phosphaté, zone de socle riche en minéraux fluorés ou roches magmatiques alcalines) associé à des régions de climat aride ou semi-aride où l'eau souterraine représente la principale ressource en eau.

Jusqu'à récemment, l'impact des éléments traces sur les quantités disponibles en eau n'était que très peu pris en compte dans la gestion des eaux souterraines. Or de nos jours, l'arsenic et le fluor sont reconnus, à l'échelle mondiale, comme les contaminants inorganiques les plus sérieux dans l'eau de consommation (Smedley and Kinniburgh 2002).

Cependant, la maintenance des infrastructures nécessaires aux traitements préalables à la consommation se révèlent parfois difficiles et coûteuses pour les populations concernées. Il apparaît plus profitable pour celles-ci de pouvoir intégrer le problème au niveau des régimes d'exploitation des points d'eau. Carrillo-Rivera et al (2002) proposent ainsi, pour le bassin de San Lui Potosi au Mexique, de contrôler les fortes concentrations en fluor à travers les débits de pompages utilisés et les connaissances des conditions hydrogéologiques de la nappe.

Références bibliographiques

Atlas Général Bordas (1957)

Bertrand, F. (2001). “Variabilité spatiale et temporelle des teneurs en fluor dans les eaux souterraines des aquifères de socles. Exemple du bassin de Maheshwaram, Andhra Pradesh, Inde.” DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud.(rapport de stage): 42 pages.

Burkhalter, R.A., Mix, T.J., McCall, M.F., Provost, D.O. (1984). “Assessing Cyanide Contamination from an Aluminum Smelter.” Environmental Sampling for Hazardous Wastes. American Chemical Society, Washington: p 15-26.

Carrilo-Rivera, J.J., Cardona, A., Edmunds, W.M. (2002). “Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi basin, Mexico.” Journal of hydrology, vol.261: p.24-47.

Chernet, T., Travi, Y., Valles V. (2001). “Mechanism of degradation of the quality of natural water in the Lakes Region of the Ethiopian rift valley.” Water Res. 35(12): p. 2819-32.

Coker, E. G., Davis R. D. (1981). “Agricultural and environmental aspects of fluoride in sewage sludge.” Water Res. Topics 1: p.211-220.

Coudrain, A., Loubet, M., Condom, T., Talbi, A., Ribstein, P., Pouyaud, B., Quintanilla, J., Dieulin, C., Dupre, B. (2002). “Données isotopiques (87Sr/86Sr) et changements hydrologiques depuis 15000 ans sur l'Altiplano andin.” Hydrological sciences journal, vol.47(2): p.293-306.

Deshmukh, A.N., Wadaskar, P.M., Malpe, D.B. (1995). “Fluorine In Environment: A Review.” Gondwana Geol. Mag, vol.9: pp. 1-20.

Diaz-Barriga, Navarro-Quezada, A., Grijalva, M.I., Grimaldo, M., Loyola-Rodriguez, J.P., Ortiz, M.D. (1997). “Endemic fluorosis in México.” Fluoride, vol.30: p.233-239.

Gaciri, S. J., Davies, T. C. (1993). “The occurrence and geochemistry of fluoride in some natural waters of Kenya.”. Hydrological sciences journal, vol.143: p. 395-412.

Koritnig, S. (1963). “Zur Geochemie Des Fluors Den Sedimenten.” Fortchr. Geol. Rheinld. Westf., vol.10: p.231.

Kumar, V.V., Sai, C.S.T., Rao, P.L.K.M., Rao, C.S. (1991). “Studies on the distribution of fluoride in drinking water sources in medchal block, Randa Reddy District, Andhra Pradesh, India.” Journal of Fluorine Chemistry, Elsevier, Lausanne, Switzerland, vol.55(3): p.229-236.

Oliviera, L., Antia, N.J., Bisalputra, T. (1978). “Culture studies and the effects from fluoride pollution on the growth of marine phytoplankters.” Journal of the fisheries research board of Canada, vol.35(11): p.1500-1504.

OMS (2002). “Fluoride in drinking water.” Environmental health information section, WHO Headquarters Office in Geneva, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland Telephone: (+00 41 22) 791 21 11 Facsimile (fax): (+00 41 22) 791 3111 www.who.int/environmental_information/Information_resources/htmdocs/Fluoride/fluoride.html

Pontié, M., Rumeau, M., Ndiaye, M., Diop, C.M. (1996). “Sur le problème de la fluorose au Sénégal: bilan des connaissances et présentation d’une nouvelle méthode de défluoruration des eaux de boisson” Cahier Santé, vol.6: p. 27-36.

Rao, N. S. (1997). “The occurrence and behavior of fluoride in the groundwater of the Lower Vamsadhara River Basin, India.” Hydrological Sciences journal, vol.42(6): p. 877-892.

Risacher, F. et Fritz, B. (2000). “Bromide geochemistry of salar of Uyuni and Deeper salt crusts, Central Altiplano, Bolivia” Chem. Geol., vol.167: p.373-392

Smedley, P., Kinniburgh, D. (2002). “United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking Water, Chapter 1: Source and behaviour of arsenic in natural waters.” www.who.int/water_sanitation_health/Arsenic/ArsenicUNRep1.htm

Smyshlyaev, S. I., Edeleva, N. P. (1992). “Determination of the solubility of minerals. Solubility product of the fluorite.” Izv. Vysshikh Uchebn. Zavedenii Khim Tekhnologii, vol.5.

Taylor, S. R. (1964). Geochim. Cosmochim. Acta, vol.28: p.1273-1285

Travi, Y. (1993). “Hydrologie et Hydrochimie des aquifères du Sénégal, Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines.” Mémoire N°95, institut de géologie, Université Louis Pasteur de Strasbourg et Centre de Géochimie de la surface, CNRS, 1, rue Blessig, F-67084 STRASBOURG Cedex France : 155 pages

Trejo-Vázquez, R. (2001). “Exposición a fluoruros del agua potable en la ciudad de Aguascalientes, México.” Rev Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health, vol.10(2) www.paho.org/Spanish/DBI/ES/v10n2-Trejo.pdf.

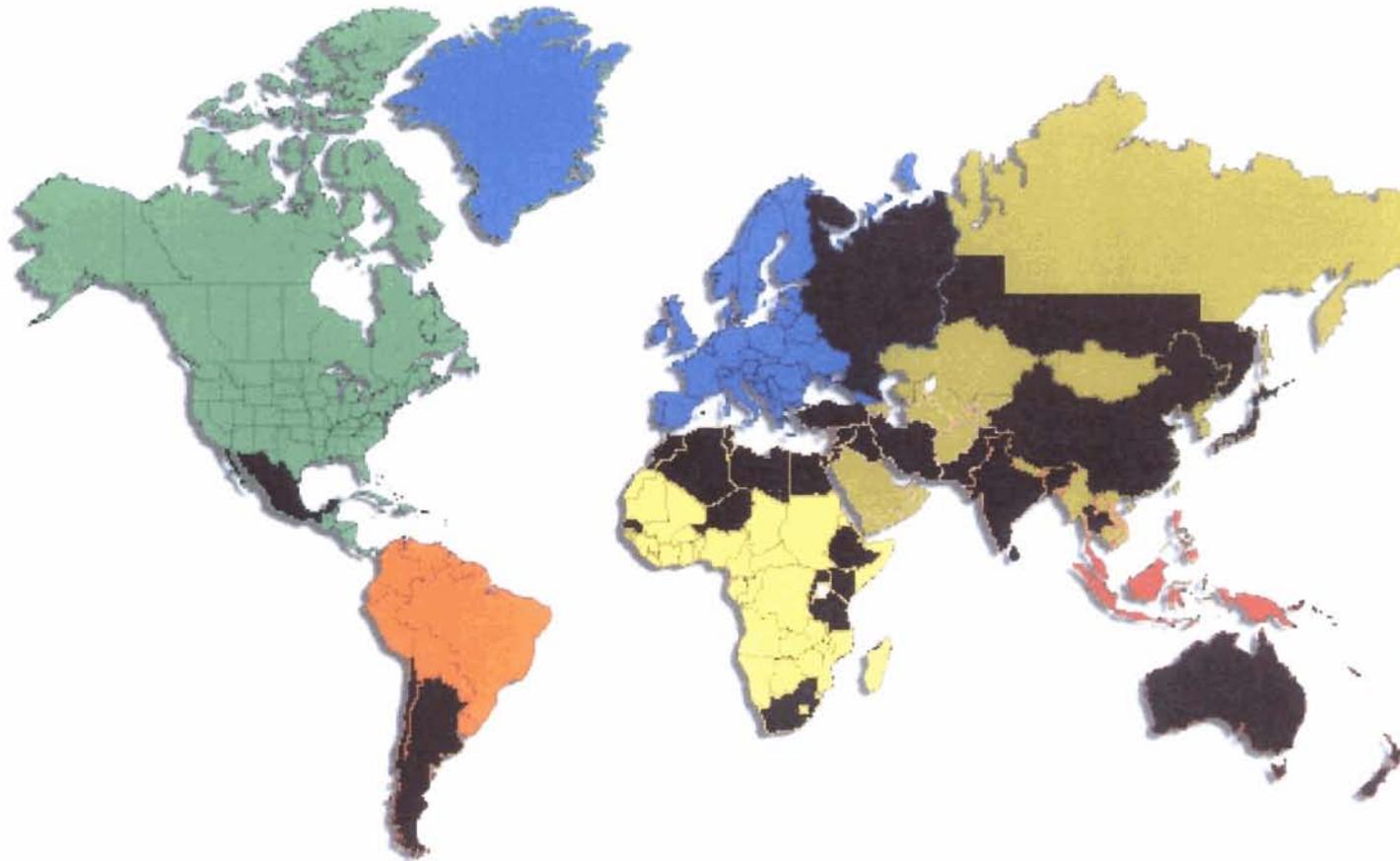
UNICEF (1998). “Fluoride in water: An overview.”
WES (Water Environment & Sanitation) Section, Programme Division,
UNICEF 3 UN Plaza, New York, NY, USA 10017
Phone: (212) 824-6000 Fax: (212) 824-6480 Email: wesinfo@unicef.org
www.unicef.org/programme/wes/info/fluor.htm

Wateraid (2002). “Water quality fact sheet: Fluoride.”
WaterAid, Prince Consort House, 27-29 Albert Embankment, London, SE1 7UB, UK
Telephone: +44 020 7 793 4500 Fax: +44 020 7 793 4545
www.wateraid.org.uk/pdf/groundwater/fluoride.pdf

Wedepohl, K. H. (1974). “Hand-book of Geochemistry.” Springer-Verlage, Berlin, Heidelberg, New York, vol.II-4: p.9K-1

Annexes

Annexe 1 zones OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et localisation des pays où la population est affectée par la fluorose en relation avec des eaux souterraines riches en fluor

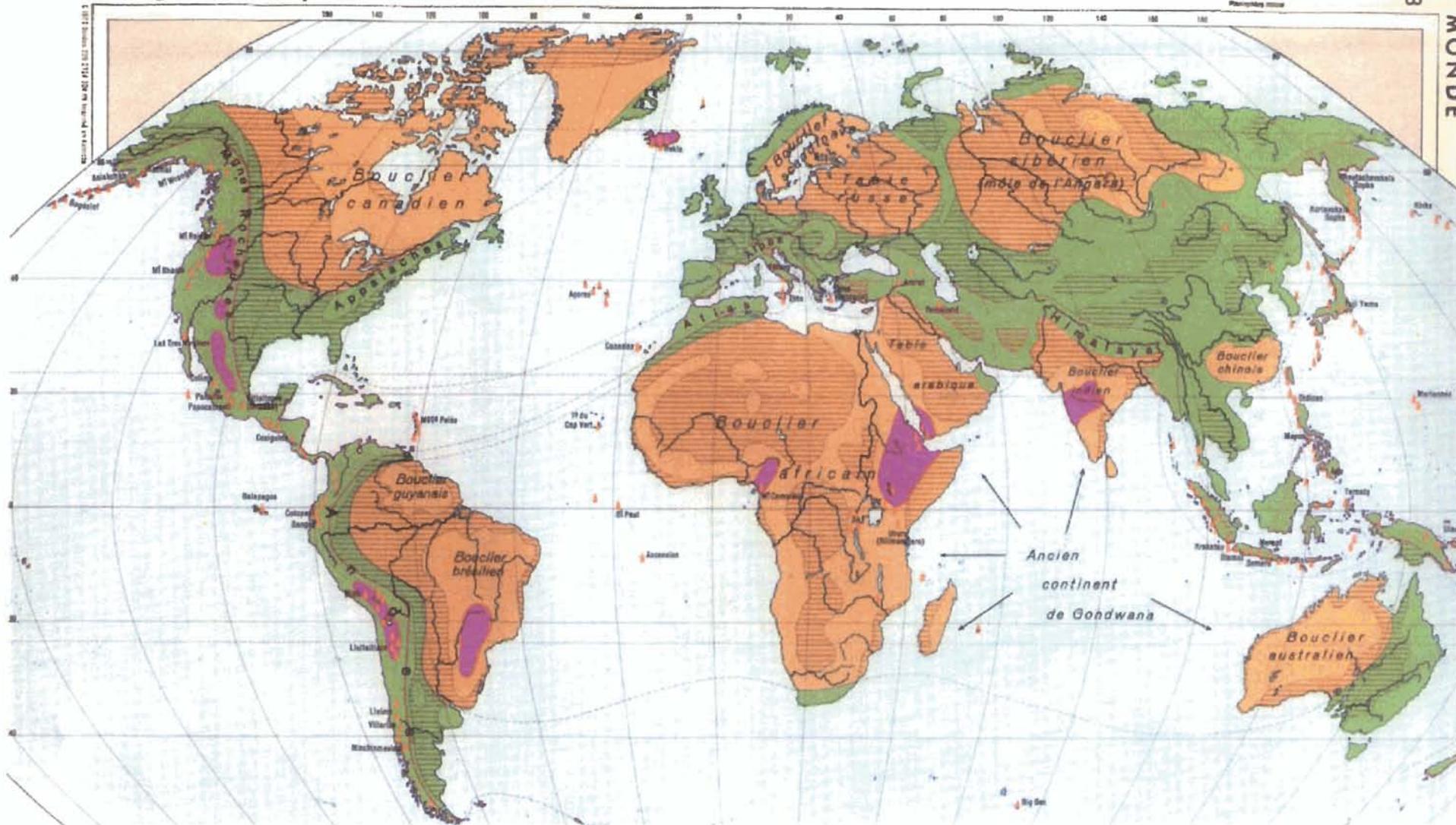


Légendes

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

Annexe 2 Géologie mondiale simplifiée d'après Atlas Général Bordas (1957)

Géologie et Tectonique

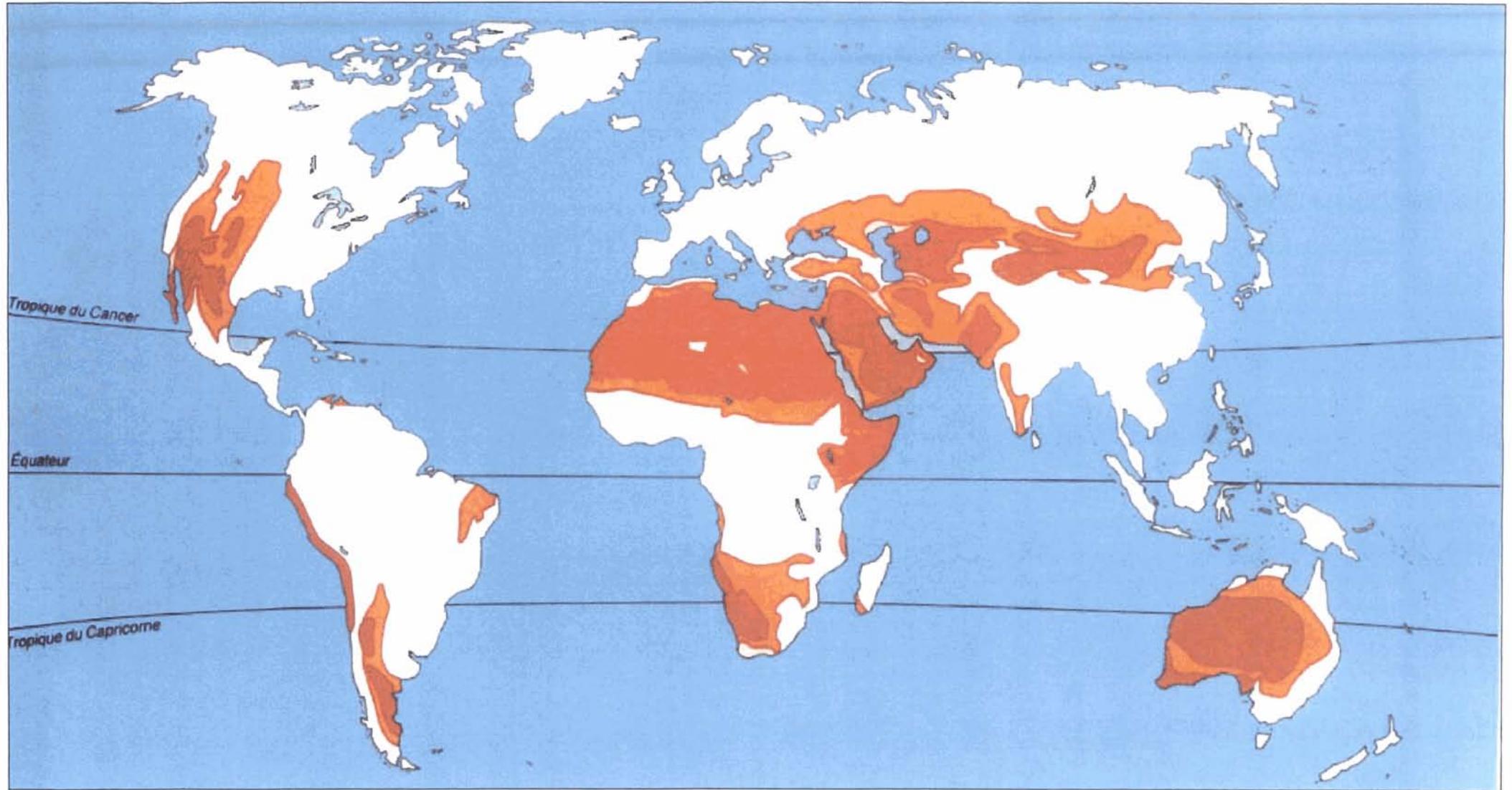


Légendes:

- | | |
|---|--|
|  Socle, continents primitifs |  Plissements primaires et récents |
|  Couverture sédimentaire |  Couverture volcanique |

Annexe 3

Localisation des régions arides et semi-arides



Légendes:

-  Climat aride ($P/ETP < 0,2$)  Climat semi-aride ($0,2 < P/ETP < 0,5$)

Annexe 4 Localisation de la zone d'étude et des sites d'échantillonnages

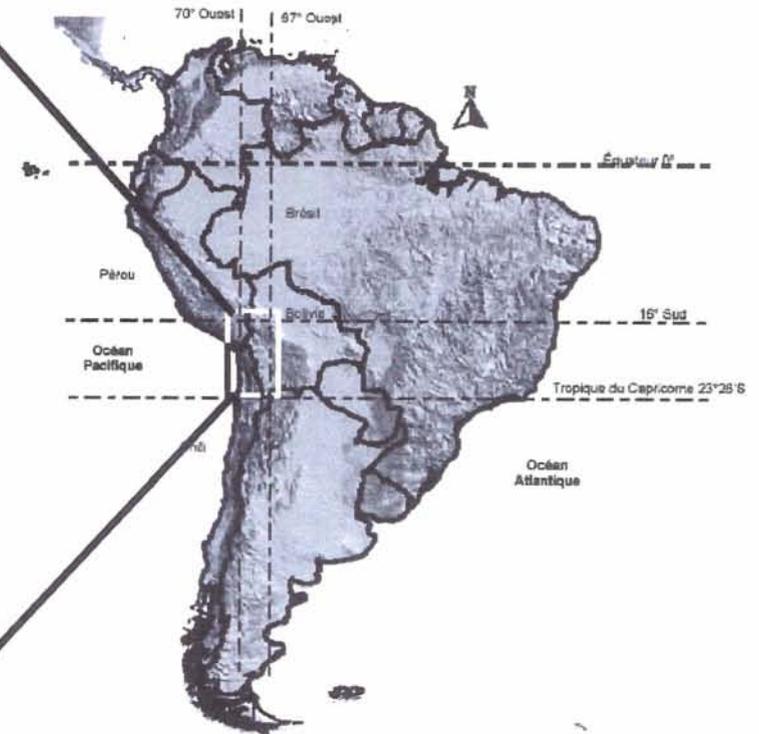
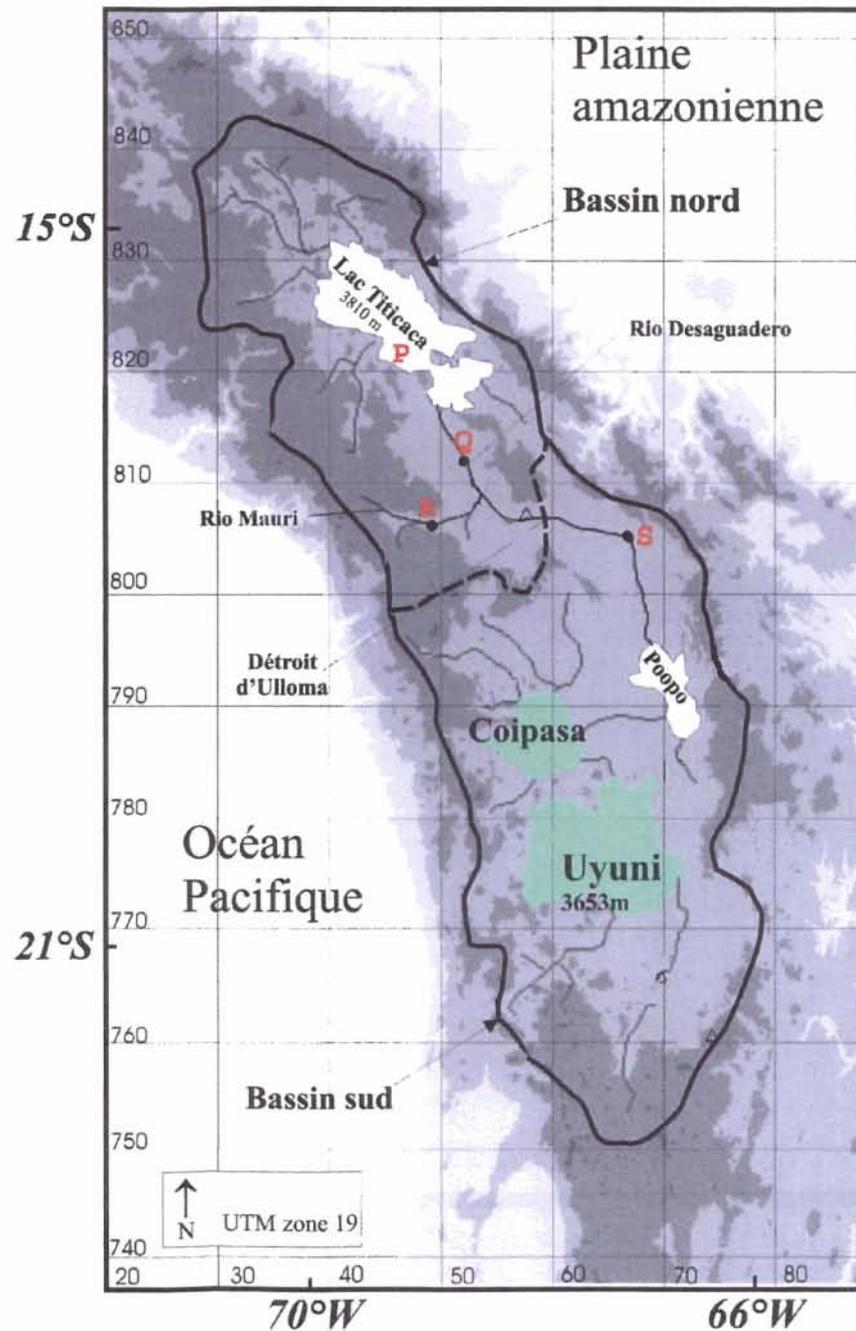
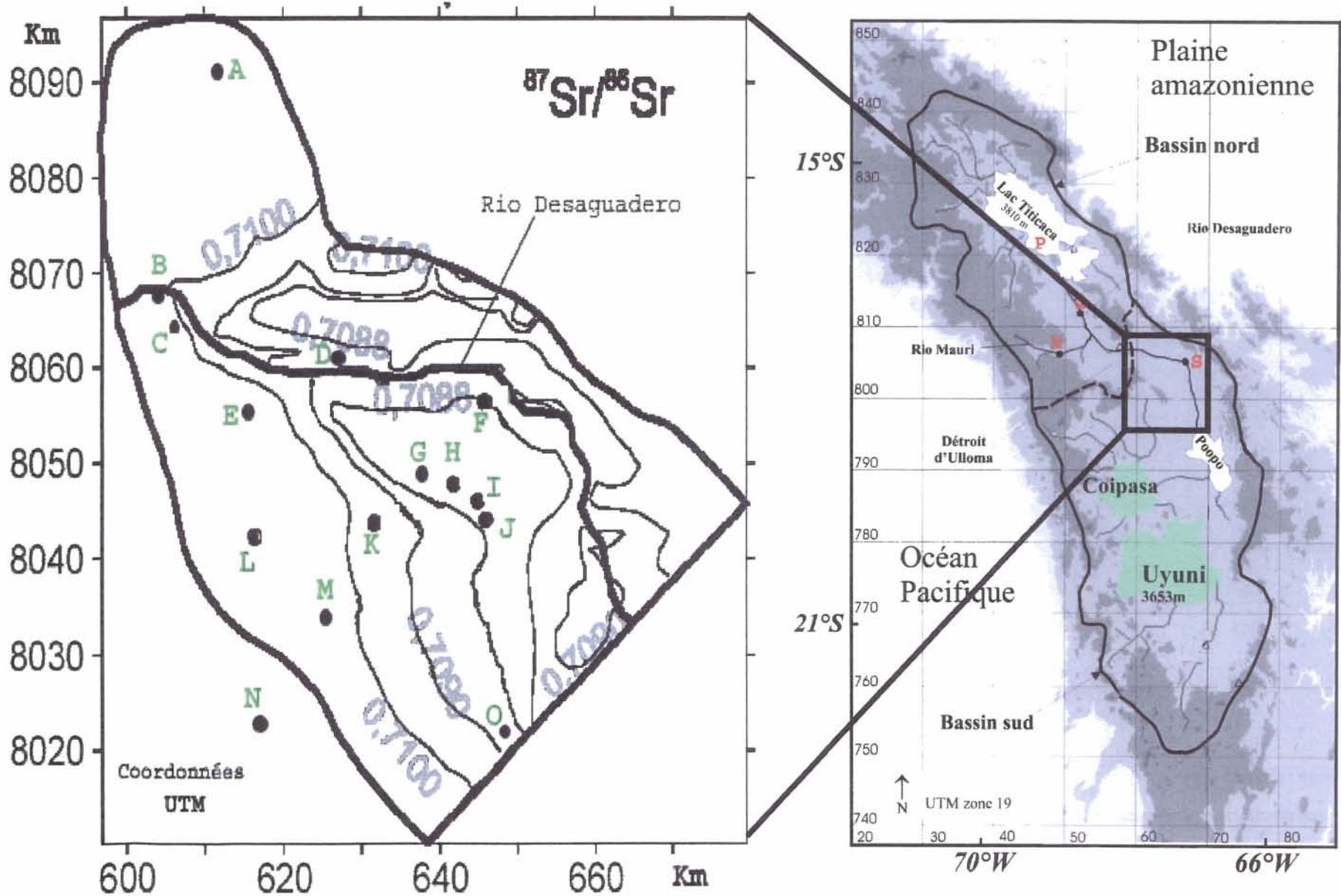


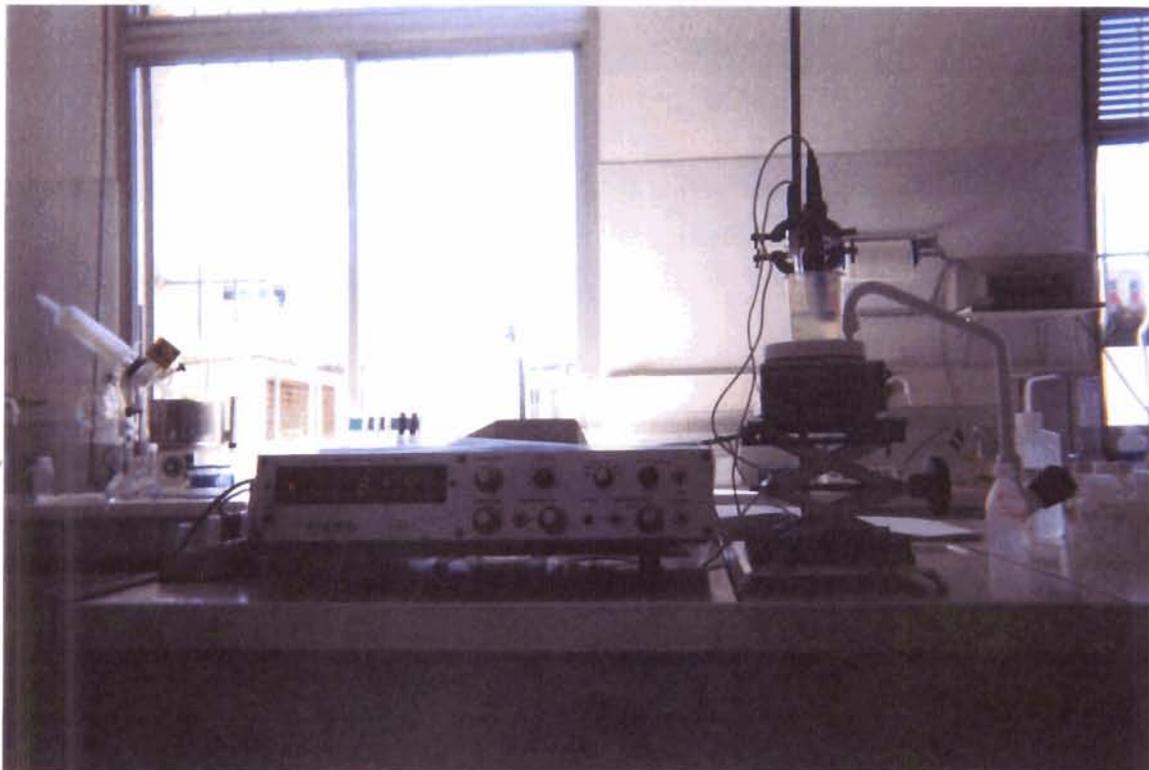
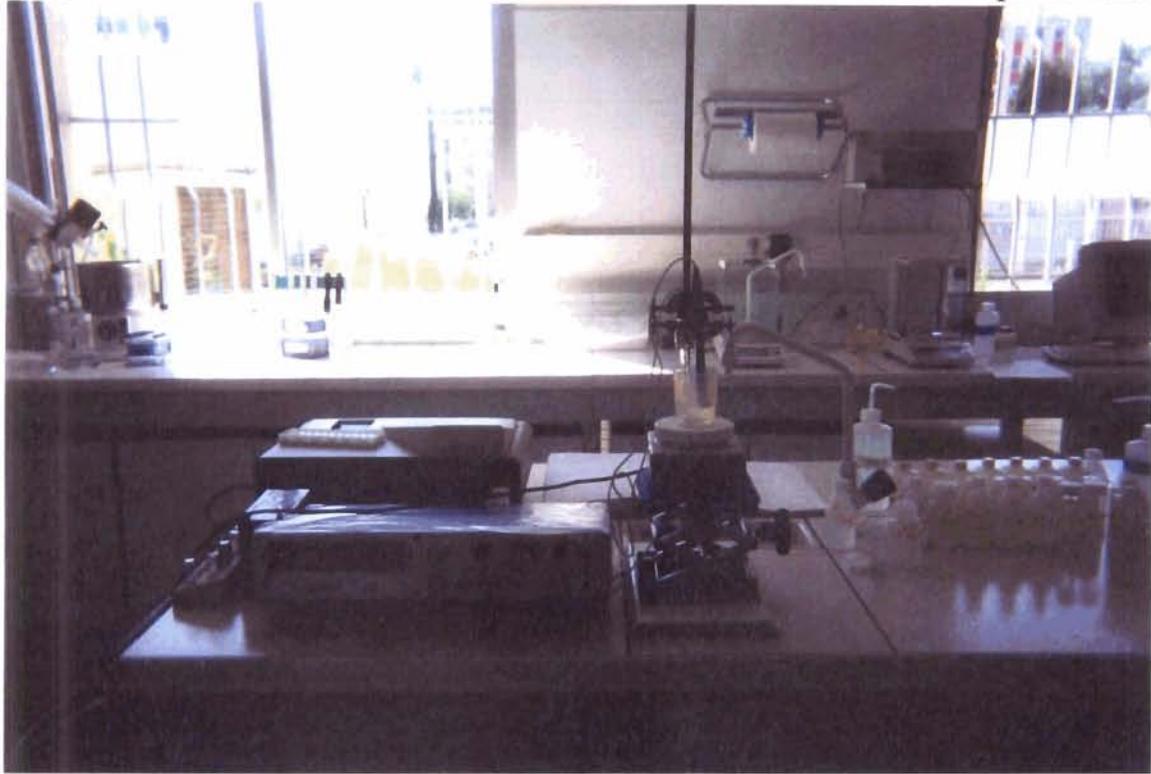
Fig. 1 Localisation de la zone d'étude et reliefs d'Amérique du sud.

Carte 4



Annexe 5

Analyses de fluor dans les échantillons d'eaux souterraines de l'Altiplano andin



Photos du montage expérimental réalisé dans le laboratoire de la MSE, avec le potentiomètre, l'électrode sélective de fluor de type ISE25F (Radiometer Analytical S.A) et l'électrode de référence Ag/AgCl saturée en calomel.

Annexe 6

Résultats des analyses effectuées sur les échantillons d'eaux souterraines de l'Altiplano Andin (dont le fluor):

Puits	Date	Coordonnées UTM		Lettre Puit sur carte	F total	Cond.	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	Na	K
		X km	Y km		mg/l	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
n°2 Petacamaya	31/03/95	612	8090	A	0,437	594	88,1	8,0	32,1	14,1	6,5	104,6	7,4
Chilahuala	23/02/95	605	8068	B	0,214	1840	82,8	11,9	14,3	96,8	17,5	256,8	12,3
	21/08/98				<0,400	1397	419,0	10,9	98,0	83,1	12,1	229,4	10,4
Huari	29/06/95	608	8063	C	0,405	623	30,8	15,1	103,8	49,9	13,1	65,7	7,2
Lucky Amaya, école, Yunta	07/04/95	629	8062	D	0,242	2890	560,1	48,8	312,7	128,5	37,2	460,5	16,6
Villa Manquiri	04/04/95	615	8056	E	0,229	600	2,4	11,1	154,6	85,5	11,4	38,5	6,6
San Miguel	30/06/95	646	8055	F	0,191	3280	664,2	53,2	283,1	113,5	30,3	547,1	16,8
	19/08/98				<0,400	3060	768,0	6,6	335,8	110,7	28,5	575,8	19,0
Unupata Bolivar	03/04/95	636	8049	G	0,116	3280	641,3	51,7	346,5	164,9	30,3	495,8	19,3
Unupata Jancko Wicho	04/04/95	641	8048	H	0,172	3510	726,0	44,9	335,6	159,5	39,3	538,1	24,1
Circa Grande	04/04/95	645	8043	I	0,137	5000	1140,4	113,9	402,9	217,3	65,8	839,1	25,2
	18/08/98				<0,400	4670	1267,8	5,0	459,5	214,4	61,8	787,0	29,8
Circa Cruzani	26/04/96	646	8041	J	0,144	5060	1173,4		297,0	173,2	59,7	887,9	24,2
	18/08/98				<0,400	5140	1530,8	<0,400	482,4	255,7	71,9	864,4	32,6
San Jose Centro	26/01/95	632	8040	K	0,133	620	39,5	10,8	126,9	81,6	7,7	40,7	5,1
	17/08/98				<0,400	679	51,6	7,8	152,2	95,6	5,6	48,8	4,8
Jalsuri	22/02/95	617	8039	L	0,154	318	16,3	8,3	32,3	47,9	3,7	11,7	3,2
Mariscal	17/05/95	626	8033	M	0,340	659	14,3	9,5	120,1	54,6	6,5	87,1	5,1
	20/08/98				<0,400	390	8,8	9,1	54,4	47,1	5,7	32,5	3,9
College Achaviri	18/05/95	617	8053	N	0,111	890	18,9	19,1	232,5	78,8	12,1	95,7	18,2
Cordeor, sud Wilha Khara	22/04/96	647	8021	O	0,289	1890	328,1	53,2	180,9	50,1	9,5	384,7	16,5

Eau de surface	Date	Coordonnées UTM		Lettre sur carte	F total	Cond.	Cl	NO3	SO4	Ca	Mg	Na	K
		X km	Y km		mg/l	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lac titicaca		536	8201	P	0,475	1464	283,6		273,8	59,7	38,2	195,0	17,7
Rio desaguadero avant la confluence Mauri	18/05/01	542	8093	Q	0,38	1423	249,2	0,2	247,9	73,7	29,9	169,0	15,0
Rio mauri	18/05/01	539	8089	R	0,29	1034	201,4	nd	80,2	47,3	14,8	129,4	12,4
Rio desaguadero à eucalyptus	08/03/01	656	8054	S	0,27	640	86,9	nd	73,5	39,3	10,8	64,4	9,0
Rio desaguadero	19/08/98				<0,4	1690	471,7	<0,400	151,4	78,8	20,1	294,1	14,6

Analyses effectuées à la MSE en 2002

Analyses effectuées par Thomas Condom en 2001

Analyses effectuées par IRD en 1998