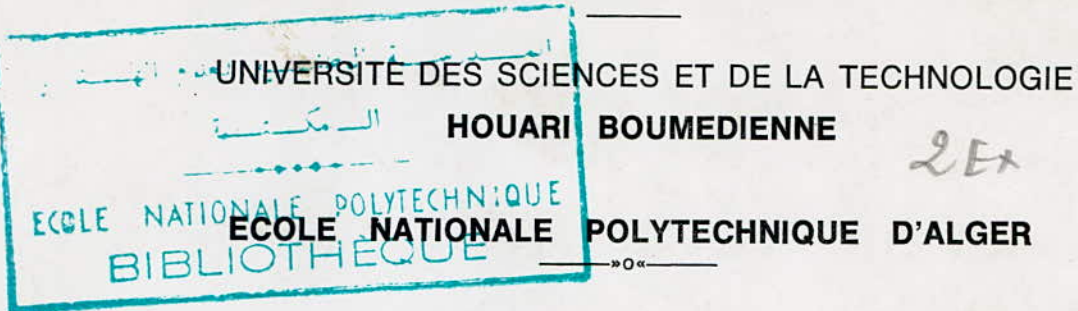


Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Département de Génie - Sanitaire

PROJET DE FIN D'ETUDE D'INGENIORAT

**ETUDE DE LA DEFLUORURATION
DE L'EAU ALBIENNE
DE LA REGION DE TOUGOURT**

Dirigée par :

Mme G. NEZZAL

(Chef du département
de Génie-Sanitaire)

Etudié par :

F. BOUSSAID

المكتبة الوطنية للعلوم الهندسية

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENNE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Département de Génie - Sanitaire

PROJET DE FIN D'ETUDE D'INGENIORAT

**ETUDE DE LA DEFLUORURATION
DE L'EAU ALBIENNE
DE LA REGION DE TOUGOURT**

Dirigée par :

Mme G. NEZZAL

(Chef du département
de Génie-Sanitaire)

Etudié par :

F. BOUSSAID

Promotion Janvier 1983

R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Nezzal, qui a bien voulu diriger mes recherches, ainsi que la Direction et le Personnel de l'I.N.R.H. de Birmandreis pour l'aide efficace qu'ils m'ont apportée et sans qui, il m'aurait été difficile de mener à bien mes travaux.

Mes remerciements vont également au Corps Enseignant qui a assuré notre formation, ainsi qu'à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de cette étude.

à la mémoire de Sėti,

à tous ceux qui me sont chers.

à la mémoire de mon Père,

à ma Mère,

à mon Oncle Amara,

à ma famille et à tous mes amis.

S O M M A I R E

INTRODUCTION.

PREMIERE PARTIE.

- CHAPITRE 1 : LES DONNEES SANITAIRES
- CHAPITRE 2 : LES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES
- CHAPITRE 3 : LES METHODES D'ELIMINATION DU FLUOR
- CHAPITRE 4 : LES **MECANISMES** D'ELIMINATION DU FLUOR PAR
DIFFERENTES METHODES

DEUXIEME PARTIE.

- CHAPITRE 1 : RAPPELS SUR LA PRECIPITATION CHIMIQUE
- CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA METHODE DE DEFLUORURATION
- CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX
- 1 -- Etude de défluoruration par précipitation
à la chaux d'une eau naturelle.
 - 2 - Influence des ions HCO_3^- et Mg^{2+} sur la défluoruration à la chaux d'une eau naturelle.

.../...

- 3 - Influence de la température sur la défluoruration d'une eau naturelle.
- 4 - Influence du PH sur la ^{défluoruration à la} chaux d'une eau naturelle.
- 5 - Influence de l'addition des adjuvants de coagulation.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION SUR LA PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5 : ETUDE SOMMAIRE D'UN DIMENSIONNEMENT

CHAPITRE 6 : DESCRIPTION DE LA FILIERE DE TRAITEMENT

CONCLUSION GENERALE.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

I N T R O D U C T I O N

Pour satisfaire les besoins des villes et des industries, on dispose d'eaux dont les origines peuvent être :

- la pluie.
- les eaux de surface.
- les eaux souterraines.
- les océans et les mers.

Toutes contiennent en proportions variables, des gaz dissous et des composés minéraux dont la nature et les proportions sont, dans le cas des eaux souterraines, en rapport avec la constitution géologique des ~~te~~**SOLS** traversés.

En effet, le contact de ces eaux avec les minéraux facilement solubles se trouvant dans le sol conduit à des concentrations en sels dissous variables, allant jusqu'aux eaux salines fortement concentrées, et qu'on ne peut utiliser directement ni pour la consommation humaine, ni à des fins industrielles ou agricoles.

Ainsi, le traitement de ces eaux apparaît comme étant d'une grande importance pour résoudre le problème de l'alimentation en eau pour les besoins des populations, des industries et du secteur agricole.

Les données physico-chimiques des eaux de consommation des régions du Sud-Est Algérien, ont montré que ces eaux présentent de fortes teneurs en fluor ajoutées à une dureté et une minéralisation excessive.

Les données sanitaires ont également montré que les fluoroses siègent à l'état endémique dans ces régions. Ainsi donc, est apparue la nécessité de défluorer ces eaux.

A cet effet, nous avons réalisé, au laboratoire en discontinu, différents essais de défluoruration sur une eau naturelle d'un forage albien de Touggourt, "Aïn Sahara".

L' étude consiste en fait à déterminer le procédé, le plus adéquat, de défluoruration de cette eau.

Le traitement par précipitation à la chaux, a été choisi pour son aspect économique et aussi parce qu'il fournit une eau répondant aux normes de qualité en fluor.

La dernière partie de cette étude abordera une description de la filière de traitement.

PREMIERE PARTIE

CHAPITRE 1 : LES DONNEES SANITAIRES

1 - GENERALITES.

Le fluor est un élément présent naturellement dans toutes les eaux souterraines des régions du Sud Algérien. Il possède deux effets antagonistes, son absence favorise les caries dentaires, mais son excès peut entraîner une fragilisation des os et de la dentition, (fluorose osseuse ou dentaire), (1).

L'émail tacheté apparaît quand les eaux de consommation contiennent plus de 0,8 à 1 mg/l. L'eau n'est pas la seule en cause, car les végétaux consommés dans ces mêmes régions sont très riches en fluorures.

Il est à noter également, qu'au-delà de 3 à 5 mg/l, les déformations dentaires peuvent s'accompagner d'une atteinte du squelette.

Des enquêtes médicales effectuées par les équipes de l'Institut National de la Santé Publique, dans les régions du Sud-Est algérien, ont permis de constater des signes graves de fluorose.

La cause essentielle en a été attribuée à l'ingestion pendant un temps relativement long, d'aliments et d'eau particulièrement riches en sels fluorés, (2).

Jenkins et Costache ont montré que la malnutrition joue un rôle très important dans la rétention des fluorures par l'organisme. On pense aux carences alimentaires qui affectent les habitants de ces régions, (à alimentation pauvre en légumes et fruits), en particulier les carences en vitamines et protéines, (3).

2 - DEFINITION DE LA FLUOROSE.

La fluorose est une intoxication chronique, caractérisée par une perte de poids, une asthénie, une anémie, une fragilité osseuse qui se traduit par une altération irréversible des tissus calcifiés, pouvant se compliquer de manifestations neuropathologiques, ajoutées aux tachetures observées sur les dents, lorsque la fixation du fluor s'est produite pendant la formation de l'émail, (4).

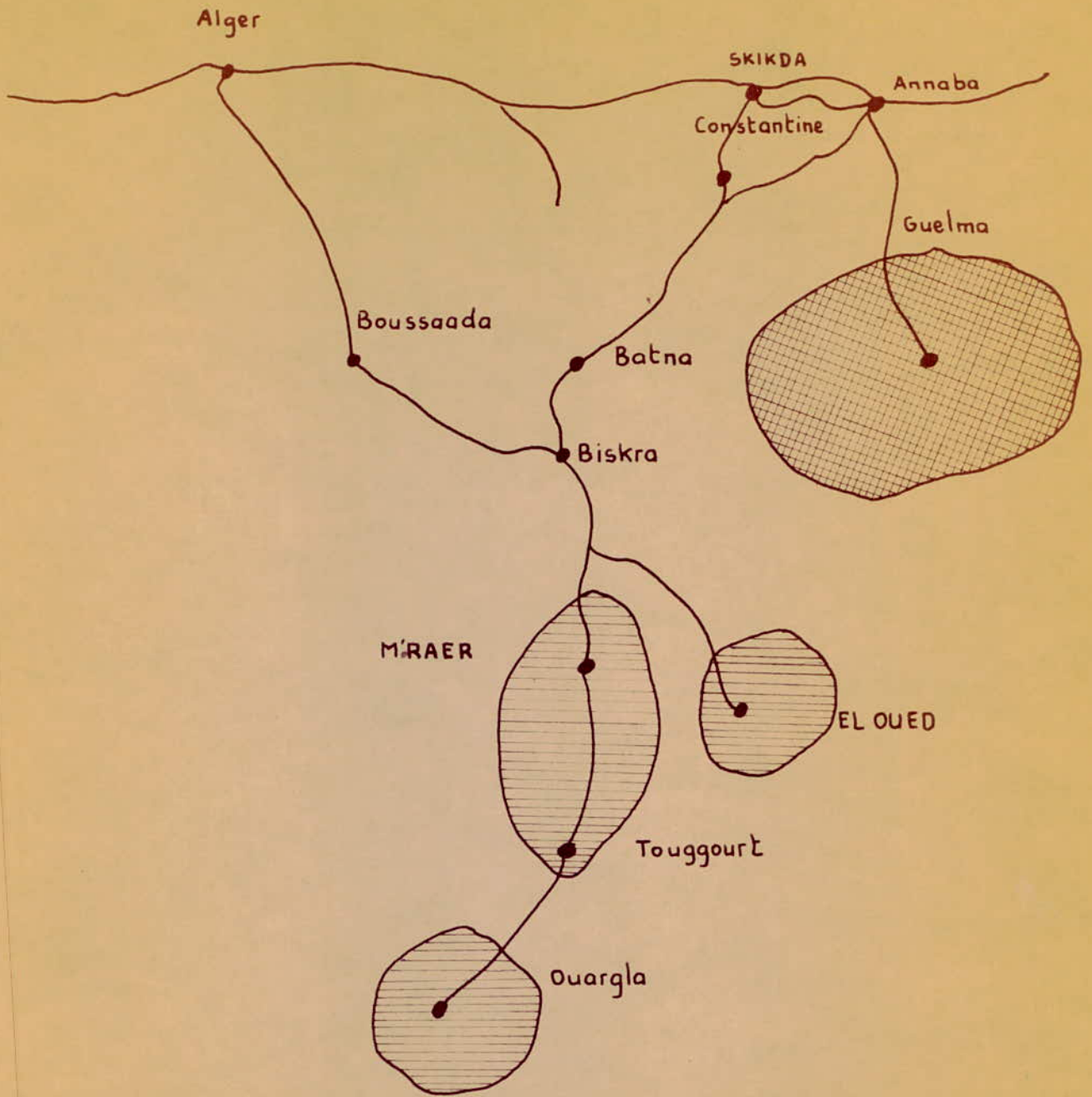
3 - STATISTIQUES SUR LES CAS DE FLUOROSSES DANS LES REGIONS DU SUD.

Dans certaines régions du Sud Algérien, où la teneur en fluor des eaux de boisson est particulièrement élevée, les fluoroses peuvent prendre un caractère endémique.

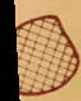
A ce jour, les enquêtes réalisées sur l'importance des fluoroses dans ces régions sont rares et incomplètes. Celles réalisées en 1966 ont fait ressortir les données suivantes :

- 75 % de la population d'El Oued, et
- 98 % des villageois du Souf sont porteurs de "DARMOUSS", maladie caractéristique de la fluorose.

La carte géographique ci-après représente les régions du Sud Algérien atteintes de fluorose et d'apatite fluorée.



. Zone Fluorose



. Zone d'apatite Fluorée

(1)

CHAPITRE 2 : LES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

Les données sanitaires abordées dans le chapitre précédent visaient essentiellement à exposer le problème et les conséquences d'un excès de fluor dans l'eau.

L'étude des ressources de la région concernée accorde une importance particulière aux phénomènes hydrogéologiques, ainsi qu'à la qualité chimique de ces eaux.

1 - RESSOURCES EN EAUX DU SAHARA SEPTENTRIONAL.

Les plus importantes ressources aquifères sont contenues dans les formations continentales. Ainsi, les nappes phréatiques forment avec les nappes albiennes, l'un des plus vaste ensemble hydraulique du Sahara Algérien.

a) Nappes phréatiques : peu profondes, elles sont utilisées depuis longtemps pour la boisson et pour l'irrigation des nombreuses oasis. Leur teneur en fluor varie de 2,55 à 5,90 mg/l, (3) et leur salinité totale de 3.000 à 4.000 mg/l, (5).

b) Nappes albiennes : profondes, elles représentent une ressource considérable d'eau et leur exploitation se développe rapidement. Leur teneur en fluor est de 1,04 à 3,08 mg/l, et leur salinité totale de 2.000 à 3.500 mg/l, (5).

2 - APERCU GEOLOGIQUE.

La nappe albienne est contenue dans un ensemble de grès argileux continentaux, déposés sur un substratum primaire qui affleure largement sur les plateaux tassiliens, (6).

Cette formation contient le plus important réservoir aquifère du Sahara : 600.000 km², 250 à 1.000 m. d'épaisseur. Elle s'étend au nord d'une ligne Reggane - Djanet jusqu'à l'Atlas Saharien, et d'ouest en est, de la vallée de la Saoura jusqu'en Tunisie et en Lybie.

La circulation de l'eau se fait de l'Atlas vers le Sud-Ouest, (Reggane) et vers le Sud Tunisien. La nappe albiennne est de plus en plus exploitée depuis quelques années, par de très grands forages jaillissants dans la région de Touggourt et Ouargla.

En tête de forages albiens profonds, l'eau arrive à des pressions élevées, (24 à 27 kg/cm²), une température de 50 à 60 °C et des débits de 100 à 400 l/s.

3 - BESOIN EN EAU DE LA REGION DE TOUGGOURT A L'HORIZON 2.000.

- Débit prélevé pour tous usages : 289 l/s.
- Débit prélevé pour l'agriculture : 8.817 l/s.

4 - QUALITE CHIMIQUE DES EAUX.

Les caractéristiques chimiques de l'eau et la minéralisation excessive de l'eau ont toutefois un effet néfaste, non seulement au niveau de la santé publique et de la potabilité de l'eau, mais également au niveau du secteur agricole, qui est de loin celui qui en consomme le plus.

a) Minéralisation totale.: les nappes albiennes de la région de Touggourt ont une salinité totale de 2.000 à 3.500 mg/l.

b) Caractéristiques physico-chimiques :

b.1 Le PH.

Le PH des eaux du Sahara varie entre 7 et 8. La détente à la sortie du forage et l'aération de l'eau perturbent les équilibres et modifient le PH. (7)

b.2 L'acide carbonique libre.

La valeur du PH comprise entre 7 et 8 et leur teneur en bicarbonates impliquent que les eaux contiennent du CO₂ libre. Ce n'est qu'après détente à l'air libre, qu'il y a dégagement du CO₂ libre, provoquant un déséquilibre carbonique et aboutissant à la précipitation de carbonate de calcium. Ce phénomène étant dû au fait que le calcium se trouve en forte teneur dans ces eaux.

b.3 La température.

La température des eaux du forage albien de la région de Touggourt est de 59° C, à la sortie du forage.

5 - RELATION ENTRE LA COMPOSITION DE L'EAU ET LA NATURE DU SOL.

Le fluor qui occupe la 17^{ème} place dans l'ordre d'abondance des éléments constituant l'écorce terrestre et qui y participe pour 0,8 %, se trouve donc naturellement dans certaines eaux ~~souterraines~~.

Les teneurs élevées peuvent être rencontrées dans le cas de roches détritiques, (sable, grès, argiles), ou dépôts fossiles d'animaux.

Si nous considérons que le fluor des eaux souterraines provient de la dissolution des roches, le temps de contact prolongé des eaux des nappes albiennes avec celles-ci augmente leur concentration en fluor.

.../...

Les variations de niveaux piezométriques dues à l'exploitation excessive des nappes pourraient également favoriser la dissolution du fluor, ou provoquer un lessivage de terrains.

6 - EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES.

L'aggravation de la qualité chimique des eaux avec l'exploitation intensive des nappes, nous a amené à étudier particulièrement la partie orientale du Sahara Septentrional.

Zone aride où des sources d'eaux autres que les nappes aquifères sont inexistantes.

- Les eaux des nappes albiennes de la région de Touggourt, secteur intéressant particulièrement notre étude, contiennent une teneur en fluorures dépassant les normes, (Réf. Tableau n° 2), qui sont suivant la température annuelle moyenne de cette région, de 0,6 à 0,8 mg/l, (limite supérieure).
- Avec en plus, une dureté excessive, une minéralisation élevée avec fortes teneurs en chlorures, sulfates, sodium, calcium et magnésium, (Réf. Tabl. n° 1).

TABLEAU N° 1

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE FORAGES ALBIENS
DE LA REGION DE TOUGGOURT

| DENOMINATION DU FORAGE | DATE DE MESU- RE | T _d | F ⁻ (mg/l) | CO ₃ H ⁻ (mg/l) | Ca ²⁺ (mg/l) | Mg ²⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | PH | TH (° F) | TAC (° F) |
|---------------------------|------------------------|----------------|--------------------------|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---|---------------------------|-----|-------------|--------------|
| SIDI MAHDI | 23.12.81 | 59 | 1,32 | 146 | 178 | 131 | 41 | 863 | 650 | 441 | 7,3 | 99 | 12 |
| AIN SAHRA | 23.12.81 | 59 | 1,04 | 153 | 174 | 126 | 38 | 510 | 713 | 260 | 7,2 | 96 | 13 |

(7)

TABLEAU N° 2

NORMES POUR LA QUALITE DE L'EAU (O. M. S.)

CONCENTRATIONS LIMITES RECOMMANDEES POUR LES FLUORURES

DANS L'EAU DE BOISSON

| MOYENNE ANNUELLE DES TEMPERATURES DIURNES MAXIMALES (° C) | CONCENTRATIONS LIMITES RECOMMANDEES POUR LES FLUORURES EN F ⁻ (mg/l) | |
|--|---|-------------------|
| | LIMITE INFERIEURE | LIMITE SUPERIEURE |
| 10,0 - 12,0 | 0,9 | 1,7 |
| 12,1 - 14,6 | 0,8 | 1,5 |
| 14,7 - 17,6 | 0,8 | 1,3 |
| 17,7 - 21,4 | 0,7 | 1,2 |
| 21,5 - 26,2 | 0,7 | 1,0 |
| 26,3 - 32,6 | 0,6 | 0,8 |

(8)

Source: N° 15

.. Détermination de la norme de potabilité de l'eau en fluor pour la région de Touggourt.

Compte tenu de la température moyenne maximale diurne annuelle, (Réf. Tab. n° 2), de la région de Touggourt, comprise entre 26,3 et 32,6° C, (9). On opte pour une limite inférieure en fluor égale à 0,6 mg/l.

Toutefois, la détermination de la concentration limite en fluorures doit également tenir compte de la consommation quotidienne en fluor par individu. Celle-ci dépend de la quantité d'eau consommée qui est dans ces régions chaudes, en moyenne de 2 à 3 l/jour. Selon les saisons et le type d'activité, elle peut s'élever de 7 à 8 l/jour, (3).

Elle dépend également du pourcentage obtenu à partir des aliments consommés, en effet, dans ces régions, une fraction importante du régime alimentaire est constituée par des denrées qui contiennent du fluor.

Il convient donc de ne pas perdre de vue ces deux faits, lorsqu'on fixe la concentration en fluorures autorisée dans l'eau de boisson.

TABLEAU N° 3

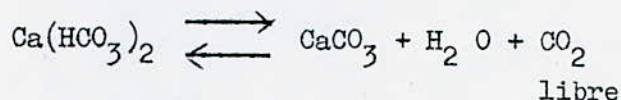
(7) NORMES CHIMIQUES ALGERIENNES DE L'EAU DE CONSOMMATION

| ELEMENTS | CONCENTRATIONS MAXIMALES AD- MISSIBLES (mg/l) | OBSERVATIONS |
|--|---|--|
| Calcium (Ca) | 200 | |
| Magnésium (Mg) | 150 | |
| Sodium (Na) | 150 | |
| Potassium (K) | 150 | |
| Ca + Mg | 500 mg/l Ca CO ₃ | |
| Chlorure (Cl) | 600 | |
| Sulfate | 400 | Si Mg ≤ 50 mg/l, sulfate ≤ 250 |
| Mg SO ₄ Na ₂ SO ₄ | 1.000 | |
| Résidu sec | 1.500 | |
| Matière en suspen- sion | 5 | |
| Oxydabilité | 3,5 | 15 pour nappe, mais après expertise géologique prouvant qu'il n'y a pas risque de pollution par infiltration |
| NH ₄ | 0,2 | 2 pour nappe, idem |
| Fer (Fe) | 1 | |
| Fluor (F ⁻) | 2 | souhaitable 0,8 mg/l |

7 - EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE. (10)

Les eaux naturelles contiennent différents éléments chimiques dissous, dont le plus fréquent est le bicarbonate de calcium.

Le bicarbonate de calcium, inconnu à l'état solide, existe à l'état instable en solution aqueuse. Il tend à perdre de l'acide carbonique et à précipiter le calcaire.

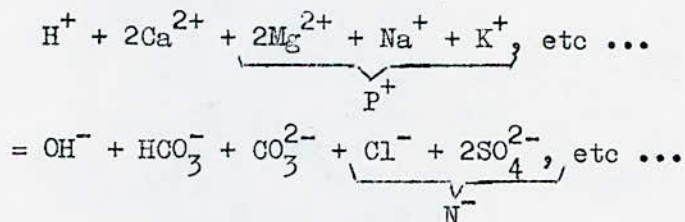


L'équilibre pratique de ce sel avec le dioxyde de carbone est régi par des lois assez complexes et son déplacement peut créer des réactions chimiques de dissolution (agressivité) de carbonate de calcium ou d'entartrage.

a) Etude générale de l'équilibre :

Toutes les études de l'agressivité carbonique reposent sur les relations suivantes :

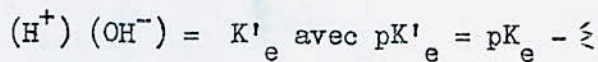
- égalité des charges électriques :



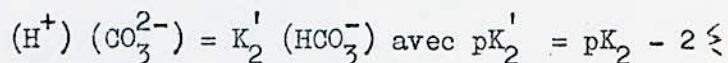
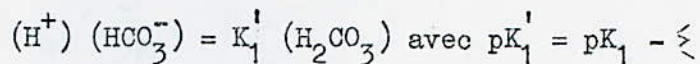
dans laquelle P^+ et N^- sont la somme des cations ou anions étrangers à l'équilibre calco-carbonique.

.../...

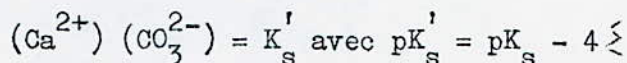
- dissociation de l'eau :



- équilibre de l'eau et de H_2CO_3 :



- produit de solubilité du CaCO_3 :



ξ dépend de la force ionique u de la solution, selon l'équation :

$$\xi = \frac{\sqrt{u}}{1 + 1,4\sqrt{u}}$$

$$\text{La force ionique } 10^3 u = \sum \frac{1}{2} C_n Z_n^2$$

C_n est la concentration de l'ion considéré, (mmol/kg), de valence Z_n .

En effet, lorsqu'une eau atteint son équilibre, elle peut, soit déposer des sels : elle est dite "incrustante", soit en fixer : elle est alors dite "agressive". (11)

La méthode de Langelier a pour but de déterminer cette propriété, elle est valable pour un PH compris entre 7 et 9,5. (11)

b) Méthode de Langelier :

Langelier a calculé le PH d'équilibre ou de saturation PH_s d'une eau à partir de quatre paramètres :

- (Ca^{2+}) , teneur en calcium;
- (HCO_3^-) , concentration totale en alcalinité;
- la salinité totale;
- le PH initial de l'eau et la température pour laquelle le PH de saturation doit être connu.

Ces paramètres ont pour valeurs respectivement dans le cas de l'eau de forage :

- $(Ca^{2+}) = 174 \text{ mg/l}$
- $(HCO_3^-) = 153 \text{ mg/l}$
- salinité totale = 2.000 mg/l
- PH initial = 7,2
(PH_0)

Langelier a aussi établi un indice I_s , "indice de saturation", égal à la différence entre le PH mesuré d'une eau considérée et son PH_s calculé :

$$I_s = PH - PH_s.$$

Si $PH < PH_s$, I_s est négatif et l'eau est agressive.

Si $PH > PH_s$, I_s est positif et l'eau est incrustante.

Dans le graphique de Langelier, (HCO_3^-) est remplacé par l'alcalinité en $CaCO_3$ et la force ionique par la concentration en sels dissous.

c) Diagramme de Hoover :

La résolution graphique selon Langelier étant assez délicate, Hoover a transformé cette résolution en un abaque à axes parallèles de lecture aisée.

Cette résolution tient compte de la salinité et de la température.

Dans le cas de notre eau, les valeurs lue sur ce diagramme, sont :

- valeur de la constante, température-salinité totale = 1,85.
- PH_s de saturation trouvé = 6,8
- indice de saturation de :

$$\begin{aligned} I &= PH_o - PH_s \\ &= 7,2 - 6,8 \\ &= 0,4 \end{aligned}$$

L'indice de saturation étant positif, l'eau de forage est incrustante, ce qui explique le dépôt de tartre dans les conduites de distribution des eaux de la région de Touggourt.

CHAPITRE 4 : LES METHODES D' ELIMINATION DU FLUOR

Des essais préliminaires, (si possible sur place), et une étude économique sont nécessaires pour définir le traitement le mieux adapté.

Les procédés qui éliminent les sels dissous partiellement, (osmose inverse et électrodialyse), ou totalement, (distillation), sont très coûteux. Mais efficaces dans le cas des eaux à forte minéralisation.

Pour une élimination spécifique, on fait plutôt appel à des procédés selectifs tels que, la précipitation chimique des éléments indésirables.

1 - ALUMINE ACTIVEE.

L'utilisation de l'alumine activée pour la défluoruration de l'eau de boisson a été suggérée par Boruff en 1934.

Le lit est régénéré avec une solution de 2 % d'hydroxyde de sodium, suivie d'une neutralisation avec dilution de l'acide chloridrique.

Sa capacité de défluoruration a été évaluée à 800 mg de F^- par litre d'alumina, (12). Le plus important facteur, influant sur la capacité de rétention de l'alumine activée, est l'alcalinité de l'effluent de l'eau.

Le stade de défluoruration sur alumine activée doit être placé en fin de traitement, après élimination de tous les autres paramètres indésirables par un traitement spécifique se terminant obligatoirement par une filtration.

L'alumine activée ne devant servir que de matériau de fixation du seul ion fluor dans une eau claire et non de matériau de rétention mécanique des autres impuretés, (8).

2 - CHARBON ACTIF. (12)

La capacité de rétention du charbon actif est de 320 mg F⁻/kg, (150 mg F⁻/l).

L'efficacité maximale d'élimination a été observée à PH = 7.

La régénération par une solution de 3 % d'aluminium, a une durée de 12 à 14 heures.

Le procédé est souvent inefficace.

3 - PHOSPHATE TRI-CALCIQUE SYNTHETIQUE. (12)

Le produit est préparé par réaction de l'acide phosphorique avec la chaux.

Sa capacité de rétention est de 700 mg F⁻/l.

Le rôle d'échangeur d'ions est joué par l'hydroxyapatite de forme Ca(OH)₂, 3Ca₃(PO₄)₂, où l'ion hydroxyde est remplacé par du fluor pour donner la fluorapatite

4 - MAGNESIE. (12)

Une étude de défluoruration sur la magnésie, (MgO), a montré que la magnésie permet d'éliminer l'excès de F⁻, mais à des doses importantes de MgO.

.../...

Le PH de l'eau traitée atteint une valeur de 10 et la correction par acidification ou recarbonatation est nécessaire.

Les quantités importantes de magnésie nécessaires au traitement, la recarbonatation et la complexité de la préparation de la magnésie, rendent ce procédé très onéreux.

5 - SERPENTINE. (12)

La serpentine est un minéral ayant pour formule : $Mg_6 Si_4 O_{10} (OH)$. Sa capacité de défluoruration a été estimée à $1,4/m^3$ de serpentine pour traiter seulement $48 m^3$ d'eau.

De plus, la serpentine ne peut être régénérée et de ce fait, le coût de défluoruration est prohibitif.

6 - PRECIPITATION CHIMIQUE A LA CHAUX.

Le procédé d'élimination par précipitation à la chaux est la technique standard pour réduire les concentrations de fluorures.

Le rendement d'élimination est amélioré par la présence d'ions Mg^{2+} dans l'eau à traiter. On estime qu'il faut 40 à 50 mg/l de magnésium pour éliminer 1 mg/l de fluor, sous forme de fluorure de calcium, (13).

Lorsque les eaux à traiter sont exemptes de magnésium, il faut opérer avec la chaux dolomitique qui fournira la magnésium nécessaire à la précipitation des fluorures, (14).

.../...

Compte tenu des caractéristiques de l'eau de la région étudiée, (richesse en magnésium, réf. tabl. n°1), le procédé d'élimination à la chaux serait donc le procédé le plus économique et le meilleur choix à faire parmi les méthodes exposées.

CHAPITRE 5 : TECHNIQUES D'ELIMINATION DU FLUOR PAR DIFFERENTES
METHODES (15)

Deux types de techniques sont habituellement utilisées pour éliminer le fluor, il s'agit :

- de l'adsorption
- de la précipitation et la coprécipitation

1 - ADSORPTION.

L'épuration est réalisée par échange général ou spécifique d'ions, ou par réaction de surface. Les milieux utilisés dans ce but sont essentiellement l'hydroxylapatite, l'alumine activée, etc ...

L'efficacité des stations d'épuration d'eaux potables fluorées, par adsorption, est donnée en tableau A.

TABLEAU A : PERFORMANCES DES STATIONS D'EPURATION D'EAUX POTABLES
FLUOREES PAR ADSORPTION (13)

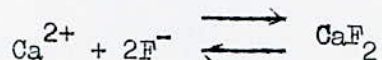
| REACTIF FILTRANT | CONCENTRATION EN FLUORURES (mg/l) | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------|
| | INITIALE | FINALE |
| Hydroxylapatite synthétique | 10 | 1,6 |
| Noir animal | 6,5 | 1,5 |
| Alumine activée | 8 | 1 |
| Hydroxyde de Mg | 3 - 4 | 0,8 - 1,1 |
| Sulfate d'aluminium | 3,6 | 0,6 - 1,5 |

Cette méthode convient pour le traitement des eaux potables ou comme traitement de polissage pour les effluents prétraités. Les niveaux d'épuration se situent entre 0,5 et 1,5 mg F⁻/l pour autant que la teneur initiale ne dépasse pas 10 mg F⁻/l.

Cette méthode ne peut généralement s'appliquer économiquement que sur des eaux peu chargées en fluorures.

2 - PRECIPITATION ET COPRECIPITATION. (15)

La technique habituelle consiste à insolubiliser et précipiter le fluor sous forme de fluorure de calcium selon la réaction :



La solubilité du fluorure de calcium est de 16 mg/l à 18°C, soit environ 8 mg F⁻/l, qui est donc le niveau d'épuration théorique en absence de tout phénomène de coprécipitation et d'adsorption.

Les performances d'installations industrielles d'épuration d'eaux résiduaires fluorées par précipitation à la chaux, données en tabl. B montrent que le degré d'épuration dépend non seulement de la réaction d'insolubilité mais aussi en grande partie de l'efficacité de la séparation solide - liquide.

Le réactif utilisé généralement comme source de calcium est la chaux, (15).

.../...

TABLEAU B : PERFORMANCES D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES D'EPURATION
D'EAUX RESIDUAIRES FLUOREES PAR PRECIPITATION A LA
CHAUX (15)

| REACTIF | CONCENTRATION EN FLUORURES (mg/l) | |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | INITIALE | FINALE |
| Chaux | 45 | 8 |
| Chaux | 4 - 20 | 6 (moyenne) |
| Chaux + chlorure de calcium | - | 12 |
| Chaux + sulfate d'aluminium | - | 1,5 |

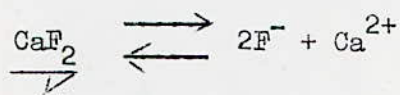
a) Etude de la solubilité des sels peu solubles :

Les procédés chimiques de traitement sont basés sur la formation d'un précipité au sein de l'eau à traiter. Les précipités se forment, jusqu'à leurs limites de solubilité, à la suite d'une réaction chimique entre les réactifs ajoutés et les substances en solution dans l'eau.

Certaines de ces substances sont également éliminées sous forme de précipités, par suite de la modification de leur état d'équilibre chimique dans l'eau.

- Equilibre de solubilité

Un composé peu soluble peut être considéré en solution saturée, comme étant totalement à l'état d'équilibre. Dans le cas du composé CaF_2 :



La solubilité de CaF_2 à 20°C = 16 mg/l (15)

soit la concentration en $(\text{Ca}^{2+}) = S = 2 \cdot 10^{-4}$ mg/l

$(\text{F}^-) = 2 S = 4 \cdot 10^{-4}$ mg/l

- Calcul théorique de la solubilité

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

$$K_s = 3,2 \cdot 10^{-11}$$

$$\text{et } f_{\pm} = 1$$

.../...

En exprimant l'activité par la concentration et le coefficient d'activité, nous avons :

$$\begin{aligned}K_s &= f_{Ca^{2+}} \cdot f_{F^-}^2 (Ca^{2+}) (F^-)^2 \\ &= f_+ \cdot f_-^2 \cdot S^3 \\ &= f_+^3 \cdot S^3\end{aligned}$$

$$f_+ = \sqrt[3]{\frac{K_s}{S^3}}$$

En expression logarithmique :

$\log K_s = 3 \log S + 3 \log f_+$, la loi limite de Debaye-Hückel, (16), nous permet d'écrire :

$\log f_+ = AZ_+ Z_- \sqrt{I}$, et en remplaçant le coefficient d'activité en fonction de la force ionique :

$$\log K_s = 3 \log S - 3 AZ_+ Z_- \sqrt{I} \quad "1"$$

A = constante = 0,504 à 20° C.

I = force ionique = $\frac{1}{2} \sum SiZi^2$.

Si = concentration des ions en solution.

Z₋ = valence des ions négatifs.

Z₊ = valence des ions positifs.

La relation "1", implique l'augmentation de la solubilité lorsque la force ionique augmente, le produit de solubilité étant constant pour une température donnée.

b) Variation de la solubilité avec la force ionique :

* effet des ions non communs

L'addition d'ions non communs, augmente la force ionique, donc augmente la solubilité avec K_s restant constant pour une température fixe.

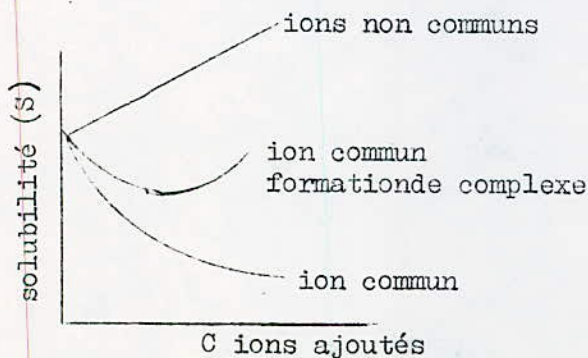
* effet des ions communs

L'addition d'un composé à ion commun Ca^{2+} , produit deux effets inverses :

- le premier effet étudié précédemment, tend à accroître légèrement la solubilité de CaF_2 , (ou la concentration en ion F^-), par diminution du coefficient d'activité f_{\pm} .

- le deuxième effet, généralement prédominant, diminue fortement la concentration en F^- , par accroissement des ions Ca^{2+} .

Compte tenu de l'effet prédominant, produit par addition d'ion commun, qui est de diminuer la solubilité des précipités, on déduit que le procédé de défluoruration à la chaux qui consiste à augmenter la concentration en ions Ca^{2+} de l'eau naturelle, (réf. tab. 1) contribue à une diminution de la solubilité du précipité formé de CaF_2 .



SOLUBILITE D'UN COMPOSE PEU
SOLUBLE AU COURS DE L'ADDITION
DE REACTIFS (16)

- CONCLUSION.

L'étude des ressources en eaux du Sud Algérien et de leur qualité chimique, a montré que :

- * du point de vue quantitatif, les ressources peuvent couvrir les besoins des habitants de ces régions.
- * par contre, du point de vue qualitatif, les eaux sont impropres à la consommation, (forte minéralisation et forte teneur en fluor).

De ce fait, le traitement des eaux de consommation de ces régions est important et nécessaire.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre précédent, notre choix s'est porté sur la méthode de défluoruration par précipitation chimique à la chaux, qui apparait comme étant la plus appropriée, compte tenu de la composition chimique de l'eau albiennne de Touggourt à traiter.

La mise en application de cette méthode, fait l'objet de la deuxième partie de cette étude.

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 1 : RAPPELS SUR LA PRECIPITATION CHIMIQUE.

La précipitation chimique commence par la formation de germes cristallins, (par association de quelques ions), et qui grossissent par fixation de nouveaux ions.

Dans le cas des procédés de précipitation chimique d'élimination, la formation des précipités est accompagnée de phénomènes secondaires, tels que la coprécipitation et l'adsorption, (16).

En effet, la surface et même l'intérieur des cristaux formés, sont un siège d'échanges et d'adsorption avec les ions de la solution. Ce mécanisme est favorisé par :

- * une concentration élevée des ions dans la solution, ce qui explique un meilleur rendement d'élimination pour une concentration élevée des ions à éliminer.
- * une agitation qui fait balayer aux germes un plus grand volume d'eau et qui favorise les collisions entre particules, d'où la croissance des cristaux.
- * une élévation de la température qui accroît toutes les vitesses de réactions et qui par conséquent favorise la formation de germes et le grossissement des cristaux, sauf dans le cas de réaction exothermique.

Le traitement de précipitation le plus courant est celui de l'adoucissement à la chaux qui conduit à une élimination partielle des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Dans notre cas de traitement, il permettra surtout l'élimination des fluorures par formation de fluorures de calcium et par adsorption sur la magnésie.

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA METHODE DE DEFLUORURATION.

Nous nous proposons d'examiner les possibilités de défluoruration d'une eau naturelle du Sud Algérien.

La détermination des doses optimales de réactifs dans le procédé d'élimination de F^- , se fait par voie expérimentale, par la méthode de "Jar-Test" ou essai au laboratoire en bocal.

Dans un premier temps, nous réaliserons quelques essais de défluoruration à la chaux d'une eau naturelle de la région de Touggourt sur laquelle l'interférence de quelques paramètres, tels que Mg^{2+} , HCO_3^- , PH et température seront examinés. Ceci nous permettra de déterminer la dose optimale de chaux à apporter suivant la composition initiale de l'eau naturelle à traiter.

Dans un deuxième temps, nous étudierons l'influence des coagulants, (17), car utilisés avec la chaux, la combinaison est favorable à la décantation.

1 - TECHNIQUE DE L'ADOUCCISSEMENT A LA CHAUX.

Cette méthode consiste à ajouter des doses croissantes d'un réactif dans les quantités égales d'une même eau à traiter contenue dans des flacons. On réalise une étude en batch, (en discontinu), pour laquelle on peut utiliser aussi bien la chaux vive que la chaux éteinte.

Dans notre cas, le produit utilisé est la chaux vive CaO à 95 % de pureté.

La méthode comporte trois phases /

- a) addition et mélange de réactifs avec forte agitation pendant un temps court. Le mélange rapide de réactifs active la précipitation, les cristaux formés pendant cette phase sont plus petits, imparfaits et par conséquent, possèdent une plus grande surface d'adsorption, (16). D'où la nécessité d'ajouter le réactif pendant l'agitation rapide.
- b) coagulation - floculation avec faible agitation pendant un temps nécessaire à l'agglomération des floccs décantables. Le processus de floculation est très complexe. Il est placé sous la dépendance de phénomènes d'adsorption provoqués par des affinités physiques, chimiques et électriques.
- c) décantation : la précipitation apparait dans cette phase de sédimentation du flocc décantable.

2 - METHODES ANALYTIQUES.

a) Mesure de l'activité de l'ion F^- :

C'est une méthode potentiométrique pour laquelle, l'électrode au fluorure est utilisée pour la détermination de la concentration et l'activité de l'ion fluorure. L'élément sensible de l'électrode est une membrane en fluorure de lanthane à un seul cristal qui agit en qualité de conducteur d'ions dans lequel, les ions fluorures peuvent se déplacer.

Dans les solutions neutres, la gamme de concentrations s'étend de 10^{-6} M/l F^- à 1 M/l F^- , alors que les temps de réponse varient de quelques secondes pour une solution à 0,1 M/l à quelques minutes pour l'extrémité inférieure de la gamme de concentrations.

L'appareil de mesure se compose de :

- une électrode indicatrice E A306 F
- une électrode de référence E A404, électrode au calomel.
- un PH-mètre potentiomètre combiné.

a.1) interférence de la mesure.

La présence de certains ions dans l'échantillon à analyser peut donner lieu aux effets suivants :

- sensibilité interférente lorsque l'ion interférent forme avec les composants de la membrane des complexes solubles ou des précipités difficilement solubles. On fait intervenir la constante de sélectivité $K_{ij} = \frac{a_i}{a_j}$ qui, pour l'électrode au fluorure est :

$K_{F^-/OH^-} = 10^{-1}$, car les ions hydroxydes sont les seuls à produire une sensibilité interférente.

- réduire l'activité de l'ion à mesurer par formation de complexes, ceci étant valable pour les cations.

Ainsi, pour éviter la formation de complexes de l'ion H^+ , on ajuste le PH à une valeur égale ou supérieure à 5 pour laquelle, HF et HF_2^- sont instables.

D'autres cations tels que Fe^{3+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} peuvent également former des complexes. Pour éviter ces interférences, on mélange les solutions échantillons ou les solutions étalons avec une solution de plus grande force ionique de façon à fixer la force ionique.

La solution "T.I.S.A.B.", (Total ionic strength adjustment buffer), est particulièrement recommandée dans le cas du dosage du fluor dans l'eau.

a.2) établissement de la courbe d'étalonnage

On prépare une solution de fluorure de sodium à partir d'une solution "metrohm A.G. standard" de concentration $C = 0,1$ mole/l. On prépare ensuite une série de solutions étalons avec des concentrations au fluor différentes. Pour la mesure, on dilue la solution dans un rapport 1/1 avec la solution "T.I.S.A.B.", (25 ml de solution T.I.S.A.B.).

b - Mesure du PH :

Le rôle primordial du PH, a été mis en évidence expérimentalement depuis longtemps, (18).

Pour chaque nature d'eau à traiter, il existe une valeur optimale de PH, dont la détermination ne peut se faire qu'expérimentalement. Nous avons donc tenu à mesurer le PH de chaque essai de défluoruration après décantation.

Par manque de moyens matériels, nous avons été dans l'impossibilité de mesurer le PH pendant l'agitation rapide et l'agitation lente.

c - Mesure de la conductance :

Nous avons suivi parallèlement l'évolution de la conductivité des solutions. Cette mesure permet de contrôler la présence des espèces ioniques.

L'expression de la conductance mesurée pour chaque échantillons, tient compte du coefficient de température ramenée à $25^{\circ} C$.

.../...

$$C = \frac{1}{R} = \frac{K}{A} \quad \text{avec,}$$

A = constante de la cellule.

C = conductance.

K = conductivité spécifique.

Si A = 1 \rightarrow C = K; d'où $K = \frac{\lambda_{\text{eq}} \times C}{1.000}$

λ_{eq} = conductivité équivalente.

C = exprime la concentration en eq g/l.

En considérant la loi d'additivité des conductivités ioniques :

$$\lambda_{\text{eq}} \cdot C = \sum \lambda_{\text{eq}}^{\circ} C$$

donc, $K = \frac{\sum \lambda_{\text{eq}}^{\circ} C}{1.000}$

si K \nearrow $\sum \lambda_{\text{eq}}^{\circ} C \nearrow$
 si K \searrow $\sum \lambda_{\text{eq}}^{\circ} C \searrow$

Les valeurs des *conductivités* ioniques de quelques ions susceptibles d'être présents dans l'eau traitée à la chaux seule ou à la chaux combinée aux coagulants, à température de 25° C, sont reprises dans le tableau suivant, (19).

| IONS | λ_{+}° | IONS | λ_{-}° |
|------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Ca ²⁺ | 59,5 | F ⁻ | 55,4 |
| H ⁺ | 349,0 | Cl ⁻ | 76,3 |
| K ⁺ | 73,5 | OH ⁻ | 197,6 |
| Fe ³⁺ | 68,0 | SO ₄ ²⁻ | 80,0 |
| Al ³⁺ | 63,0 | | |
| Na ⁺ | 50,1 | | |

CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

1 - ETUDE DE DEFLUORURATION PAR PRECIPITATION A LA CHAUX D'UNE EAU NATURELLE

On se propose au cours de cette étape, d'effectuer un essai de défluoruration sur une eau albienne de consommation de la région de Touggourt, "Forage Albien Aïn Sahra".

a) Analyse des échantillons :

Les échantillons ont été prélevés en tête de forage. La détermination des principales caractéristiques physico-chimiques de cette eau a donné les résultats présentés sur le tableau n° 1.

La concentration en fluor de ces eaux dépassent celles admises par les normes de l' O.M.S.

b) Calcul théorique de la dose de chaux nécessaire à la précipitation :

Suivant la réaction :



La stochiométrie de cette réaction nous permet d'obtenir la dose théorique de chaux permettant l'élimination du fluor sous forme de Ca F_2 .

Elle est de $1,55 \text{ g CaO/gF}^-$

c) Essai de défluoruration :

c.1) calcul de la dose théorique de chaux

La quantité de chaux vive nécessaire à l'adoucissement est donnée par la formule :

$$\text{CaO mg/l} = 28 (\text{TAC} + 2 \text{ TMg} + \text{C}) \quad (19)$$

où TAC = titre alcalimétrique complet (me⁻/l)

TMg = teneur totale en magnésium (me⁻/l)

C = teneur en CO₂ libre (me⁻/l), déterminé à l'aide d'un graphique, (20) "Rapport entre l'alcalinité au méthylorange, la teneur en CO₂ et le PH".

c.2) détermination de la dose optimale de chaux

Les essais réalisés au laboratoire, permettent de déterminer, dans le cas de cette eau, les doses optimales de chaux à apporter au traitement.

- Méthode d'essai :

- * les doses croissantes de chaux ont été introduites dans des volumes de 200 ml identiques, d'eau naturelle à traiter et ce au cours de l'agitation rapide.
- * la totalité de la chaux mise en oeuvre en suspension dans 10 ml d'eau, est ajoutée en une fois.

- Conditions opératoires :

Nous avons réalisé des essais identiques, mais ayant des temps d'agitation et de décantation différents. Cela nous a permis de constater que la durée d'agitation de plus de 15 minutes n'a aucune influence sur l'efficacité du traitement.

Dès lors, nous avons opté pour les conditions d'essai suivantes

- * une agitation rapide d'une minute, suivie
- * d'une agitation lente de quinze minutes, puis
- * d'une décantation de quinze minutes également.

Les résultats sont résumés sur le tableau N° 4; la teneur résiduelle en fluor, le PH et la conductivité sont mesurés après décantation.

TABLEAU N° 4

RENDEMENTS DE DEFLUORURATION A LA CHAUX D'UNE EAU

NATURELLE

PH initial = 7,2

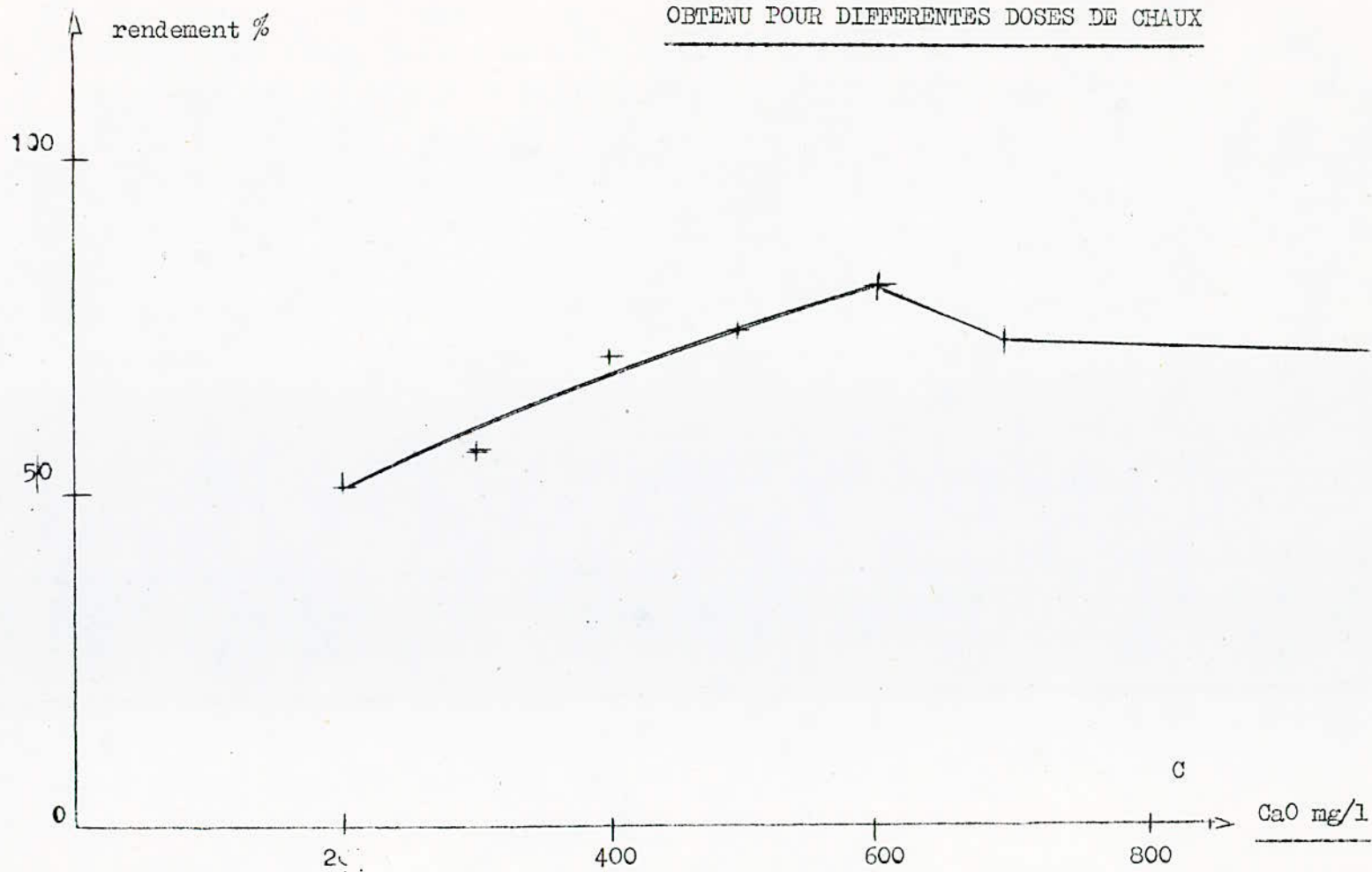
Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

| QUANTITE DE REACTIF (mg/l) | APRES DECANTATION | | | |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--|-----------|
| | PH | Conductivité en mm hos à 25° C | Teneur résiduelle en F ⁻ (mg/l) | Rendement |
| Ca O | | | | |
| 100 | 8,2 | 3,07 | 0,77 | 25 % |
| 200 | 9,5 | 3,46 | 0,51 | 51 % |
| 300 | 10,1 | 3,55 | 0,46 | 56 % |
| 400 | 10,1 | 3,55 | 0,31 | 70 % |
| 500 | 10,2 | 3,55 | 0,27 | 74 % |
| 600 | 10,2 | 3,63 | 0,20 | 81 % |
| 700 | 10,4 | 3,74 | 0,29 | 72 % |
| 1.000 | 11,3 | 3,76 | 0,31 | 70 % |

RENDEMENT DE DEFLUORURATION D'UNE EAU NATURELLE

OBTENU POUR DIFFERENTES DOSES DE CHAUX



- Interprétation des résultats :

Le tableau n° 4 montre que le rendement optimal d'élimination du fluor est obtenu pour une dose de chaux égale à 600 mg/l pour un rendement de 81 %.

Cette dose est légèrement inférieure à la dose théorique calculée précédemment dans le cas de l'adoucissement. En effet, le procédé de défluoruration à la chaux qui consiste à ajouter des doses croissantes de chaux dans l'eau à traiter permet un apport supplémentaire d'ions Ca^{2+} et OH^- , et par conséquent l'augmentation de la force ionique et de la concentration des ions Ca^{2+} .

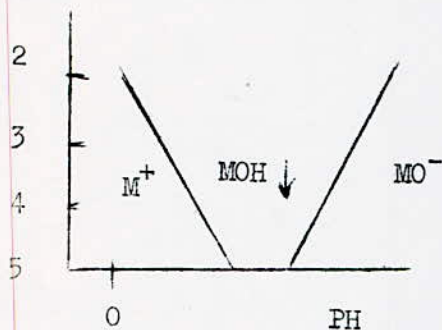
Nous rappelons que l'eau à traiter contient initialement une quantité de 174 mg/l de Ca^{2+} . L'évolution du rendement obtenue, illustrée au tableau n° 4, serait donc due à l'effet prédominant de l'addition d'ions communs Ca^{2+} qui provoque la reprécipitation des sels, entraînant par conséquent une diminution de la concentration des ions F^- . En effet, le produit de solubilité $K_s = (\text{Ca}^{2+}) (\text{F}^-)^2$ restant constant à température donnée, l'augmentation des ions Ca^{2+} entraîne une diminution de la concentration de F^- . On note également à $\text{PH} > 10$, une amélioration notable du rendement due à l'adsorption probable d'ions F^- sur les précipités formés de $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

- précipitation de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ $\text{PH} > 10,5$
- précipitation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{PH} = 13$
- précipitation de $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ $\text{PH} > 8,5$

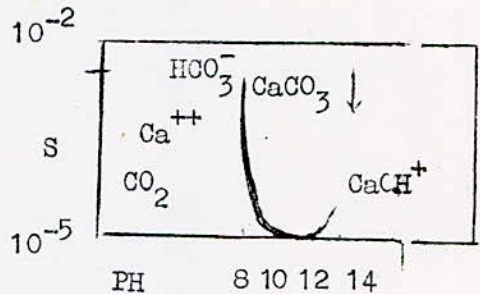
Des doses supérieures à 600 mg/l de chaux, font baisser le rendement de défluoruration

En effet, à des doses importantes de chaux, le PH devient basique, et une redissolution des précipités est probable. Les graphes (16), de la solubilité apparente des hydroxydes en fonction du PH, illustrent le phénomène :

$-\log S$

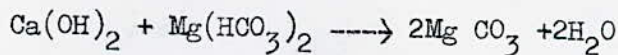
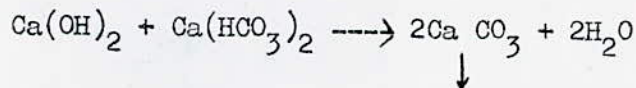


LOGARITHME DE LA SOLUBILITE APPARENTE D'UN HYDROXYDE EN FONCTION DU PH

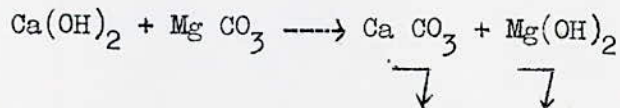


SOLUBILITE APPARENTE DU CARBONATE DE CALCIUM EN FONCTION DU PH

La conductivité initiale diminue après l'ajout de 100 mg/l de CaO, ceci s'explique par le phénomène d'adoucissement qui consiste à précipiter les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} suivant les réactions chimiques :



Le carbonate de magnésium étant relativement soluble, un excès de chaux conduira à la réaction : (10)



.../...

A partir de ce moment, on remarque que la conductivité reste constante. Un excès plus important de chaux provoque de nouveau une augmentation de la conductivité, ce qui probablement peut s'expliquer par une redissolution des précipités formés, due à un PH basique.

Nous avons alors jugé utile de considérer l'influence de la présence des ions Mg^{2+} et des ions HCO_3^- . Le Ph de précipitation est fonction de la concentration des ions correspondants, en l'occurrence Ca^{2+} , Mg^{2+} et du domaine d'équilibre des divers ions de l'équilibre carbonique :

| | | | |
|------------------|-----------|-----------|-------------|
| $H_2CO_3 (CO_2)$ | H_2CO_3 | HCO_3^- | CO_3^{2-} |
| 3,9 | 6,4 | 10,43 | |

2 - INFLUENCE DES IONS HCO_3^- et Mg^{2+} SUR LA DEFLUORURATION A LA CHAUX.

La concentration initiale de l'eau naturelle à traiter en ions HCO_3^- et Mg^{2+} est respectivement de 153 et 126 mg/l. La **connaissance** de ces concentrations est importante pour l'étude d'un traitement d'adoucissement par précipitation à la chaux.

En effet, l'addition de la chaux à cette eau entraîne la précipitation des ions HCO_3^- et Mg^{2+} sous formes de CaCO_3 et $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Nous avons vu précédemment que le PH de précipitation est fonction de la concentration en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , et du domaine d'équilibre carbonique, à cet effet nous avons mesuré le PH de chaque essai traité.

Dans le but de concrétiser l'influence de ces ions sur l'élimination du fluor par rapport à la dose de chaux, nous avons fait une représentation graphique du rendement en fonction des rapports $\text{CaO}/\text{HCO}_3^-$ et $\text{CaO}/\text{Mg}^{2+}$.

La variation importante du rendement par l'apport artificiel d'ions HCO_3^- , nous a amené à étudier les interférences qui pourraient survenir lors de l'élimination du fluor, en introduisant dans l'eau naturelle à traiter des concentrations en bicarbonates relativement faibles, sous forme d'hydrogène-carbonate de sodium anhydre.

Celles de Mg^{2+} ont de même été introduites sous forme de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

2.) - INFLUENCE DES IONS HCO_3^-

La concentration en ions HCO_3^- de l'eau utilisée pour les essais, a été chaque fois augmentée par l'ajout de quantités croissantes d'hydrogencarbonate de sodium anhydre.

Méthode d'essai :

Après l'addition de doses croissantes en ions HCO_3^- aux échantillons, la chaux a été introduite comme précédemment et avec les conditions opératoires identiques.

Les résultats sont donnés dans les tableaux n° 5 et 6.

TABLEAU N° 5 : INFLUENCE DES IONS BICARBONATES HCO_3^- SUR LA DEFLUORURATION

Dose de chaux : 200 mg/l.

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 m nhos à 25° C.

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l.

Teneur initiale en HCO_3^- = 153 mg/l. (7)

Résultats expérimentaux :

| QUANTITE DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | | |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------|--|-----|-----------|
| CaO | HCO_3^- | $\text{CaO}/\text{HCO}_3^-$ | Conductivité en m nhos à 25° C | Teneur résiduelle en F^- (mg/l) | PH | Rendement |
| 200 | 153 | 1,30 | 3,55 | 0,51 | 9,5 | 50 % |
| 200 | 158,5 | 1,26 | 3,63 | 0,31 | 9,2 | 70 % |
| 200 | 164 | 1,21 | 3,63 | 0,30 | 8,9 | 71 % |
| 200 | 169,5 | 1,17 | 3,58 | 0,31 | 8,7 | 70 % |
| 200 | 175 | 1,14 | 3,48 | 0,35 | 8,5 | 66 % |

TABLEAU N° 6 : INFLUENCE DES IONS BICARBONATES HCO_3^- SUR LA
DEFLUORURATION A LA CHAUX

Dose de chaux : 400 mg/l

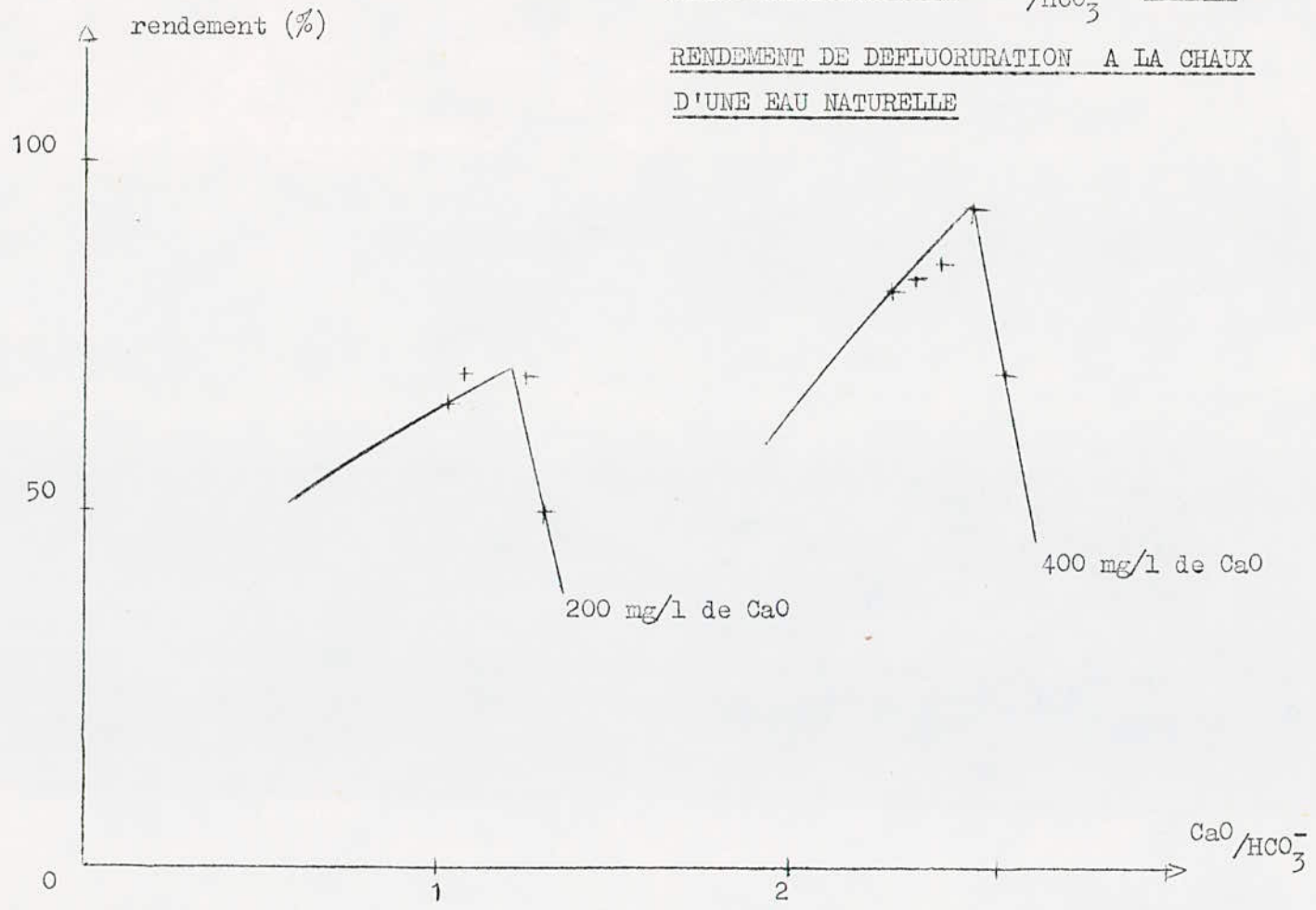
PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 m nhos à 25° C

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | | |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|---|---|------|----------------|
| CaO | HCO_3^- | CaO/ HCO_3^- | Conduc- tivité en m nhos à 25° C | Teneur résiduelle en F^- (mg/l) | PH | Rende- ment |
| 400 | 153 | 2,61 | 3,55 | 0,31 | 10,1 | 70 % |
| 400 | 158,5 | 2,52 | 3,69 | 0,06 | 9,5 | 94 % |
| 400 | 164 | 2,43 | 3,63 | 0,14 | 9,2 | 86 % |
| 400 | 169,5 | 2,35 | 3,65 | 0,15 | 9,1 | 85 % |
| 400 | 175 | 2,28 | 3,63 | 0,16 | 9,0 | 84 % |

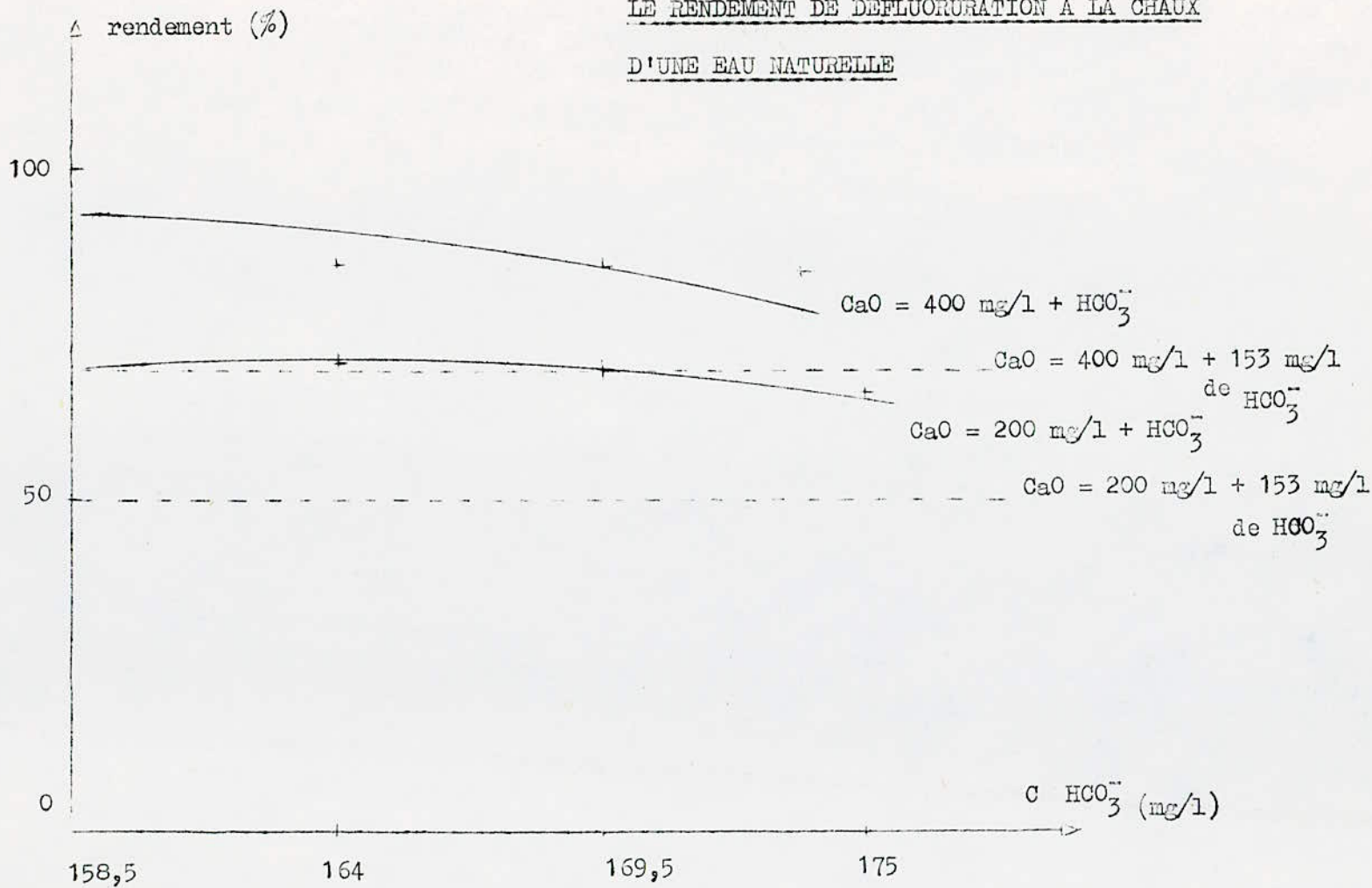
INFLUENCE DU RAPPORT $\text{CaO}/\text{HCO}_3^-$ SUR LE
RENDEMENT DE DEFLUORURATION A LA CHAUX
D'UNE EAU NATURELLE



INFLUENCE DES IONS BICARBONATES HCO_3^- SUR

LE RENDEMENT DE DEFLUORURATION A LA CHAUX

D'UNE EAU NATURELLE



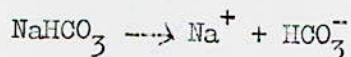
- Interprétation des résultats :

D'après les résultats expérimentaux, nous constatons que l'addition artificielle d'ions bicarbonates à l'eau naturelle améliore le rendement de défluoruration.

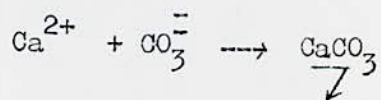
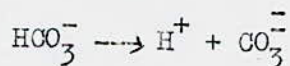
Les rendements obtenus sur les tableaux 5 et 6 montrent que pour une dose de chaux de :

- 200 mg/l, le rendement optimal de 71 % est obtenu pour une quantité de HCO_3^- ajoutée, de 11 mg/l.
- 400 mg/l, le rendement optimal de 94 % est obtenu pour une quantité de HCO_3^- ajoutée, de 5,5 mg/l.

La représentation graphique du rendement en fonction du rapport $\text{CaO}/\text{HCO}_3^-$ montre qu'une teneur croissante de bicarbonate, entraîne une baisse de rendement. Ce phénomène est attribué d'une part, à l'abaissement du PH suivant la réaction :



L'addition de chaux provoque :



En effet, l'abaissement du PH, empêche la précipitation des magnésium initialement présents dans l'eau naturelle, donc diminue le phénomène d'adsorption des ions fluorures et déplace l'équilibre carbonique. De ce fait, les ions CO_3^{--} ne sont plus disponibles pour la précipitation des ions Ca^{2+} en CaCO_3 et par conséquent l'entraînement probable des ions fluorures par les cristaux de carbonate de calcium est réduit. Et d'autre part, la baisse du rendement est également attribuée à l'influence probable des ions non communs, (après précipitation des ions HCO_3^- initiaux dans l'eau, qui augmente la solubilité de CaF_2 et de CaCO_3 par suite de l'augmentation de la force ionique.

23) - INFLUENCE DES IONS Mg^{2+} .

La concentration initiale en Mg^{2+} de l'eau naturelle à défluorer a été augmentée dans chaque échantillon d'essai par addition de quantités croissantes de $Mg Cl_2 \cdot 6 H_2O$.

Méthode d'essai :

Les essais ont été réalisés sur 200 ml d'eau naturelle. Après addition des doses croissantes de Mg^{2+} aux échantillons, l'introduction de la chaux et les conditions d'essai ont été les mêmes que précédemment.

Le PH, la conductivité et la teneur en fluor résiduel ont été mesurés après décantation.

Les résultats sont donnés dans les tableaux n° 7 et 8.

TABLEAU N° 7 : INFLUENCE DES IONS Mg^{2+} SUR LA DEFLUORURATION A LA CHAUX
D'UNE EAU NATURELLE

Dose de chaux : 600 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 m nhos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Teneur en Mg^{2+} initiale = 126 mg/l (7)

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | | |
|------------------------------|-----------|-------------------|------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| CaO | Mg^{2+} | CaO/Mg^{2+} | PH | Conductivité en m nhos à 25° C | Teneur résiduelle en F^{-} (mg/l) | Rendement |
| 600 | 126 | 4,76 | 10,2 | 3,63 | 0,20 | 80 % |
| 600 | 234 | 2,56 | 9,8 | 7,24 | 0,048 | 95 % |
| 600 | 342 | 1,75 | 9,7 | 10,10 | 0,06 | 94 % |
| 600 | 450 | 1,33 | 9,7 | 12,31 | 0,06 | 94 % |
| 600 | 558 | 1,07 | 9,7 | 13,76 | 0,06 | 94 % |

TABLEAU N° 8 : INFLUENCE DES IONS Mg^{2+} SUR LA DEFLUORURATION
A LA CHAUX D'UNE EAU NATURELLE

Dose de Chaux : 400 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 m nhos à 25° C

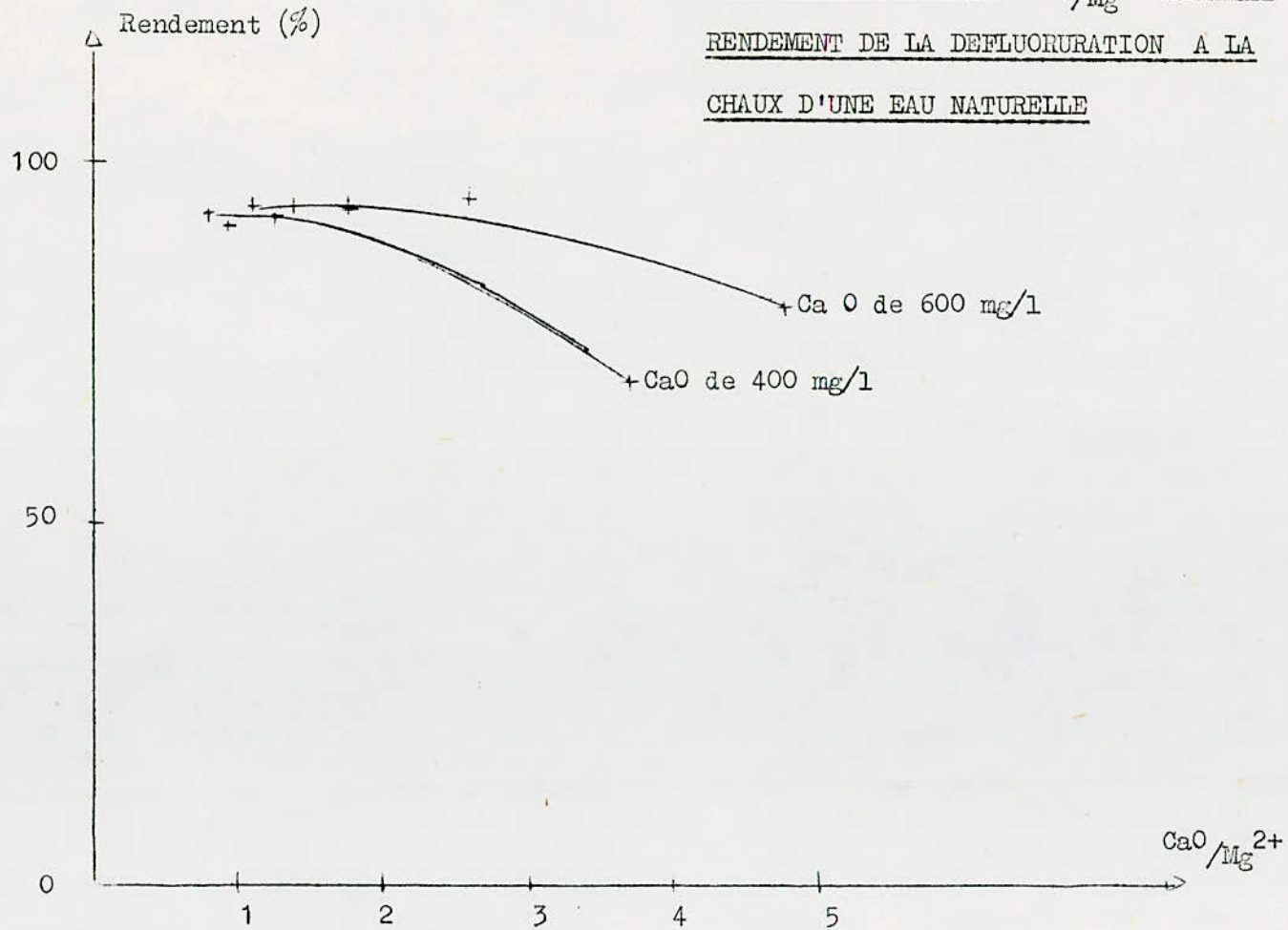
Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Teneur en Mg^{2+} initiale = 126 mg/l (7)

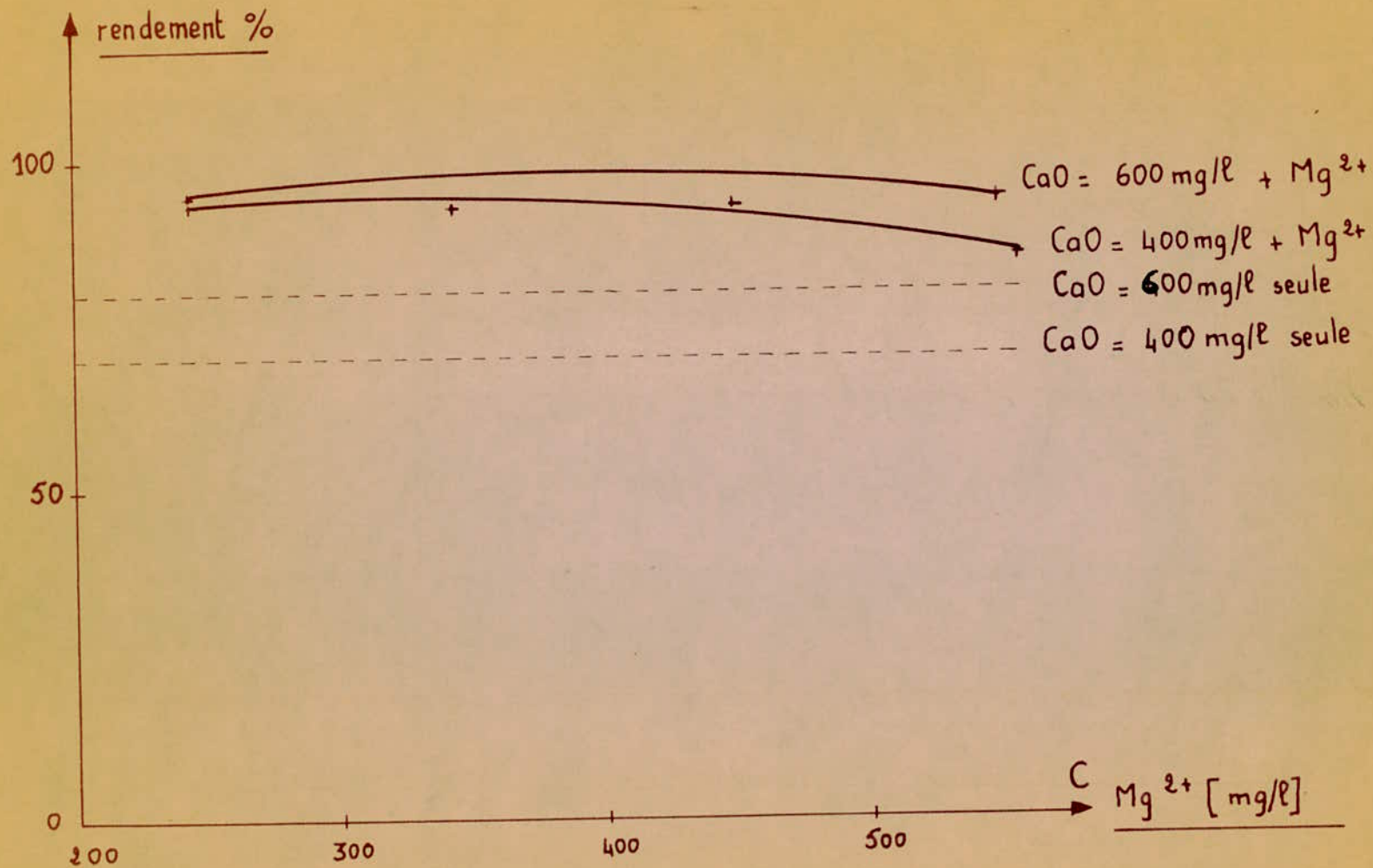
Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | | |
|---------------------------------|-----------|----------------------|------|--------------------------------------|--|----------------|
| CaO | Mg^{2+} | CaO/ Mg^{2+} | PH | Conductivité en m nhos à 25° C | Teneur résidu- elle en F-(mg/l) | Rende- ment |
| 400 | 126 | 3,17 | 10,1 | 3,55 | 0,31 | 70 % |
| 400 | 234 | 1,7 | 9,7 | 6,86 | 0,060 | 94 % |
| 400 | 342 | 1,1 | 9,2 | 9,98 | 0,071 | 93 % |
| 400 | 450 | 0,88 | 8,9 | 12,35 | 0,071 | 93 % |
| 400 | 558 | 0,71 | 8,1 | 14,53 | 0,014 | 86 % |

INFLUENCE DU RAPPORT $\text{CaO}/\text{Mg}^{2+}$ SUR LE
RENDEMENT DE LA DEFLUORURATION A LA
CHAUX D'UNE EAU NATURELLE



Influence des ions Mg^{2+} sur le rendement de défluoruration à la chaux



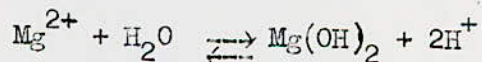
- Interprétation des résultats :

L'amélioration des rendements obtenue est très importante.

Pour une dose de chaux de :

- 400 mg/l, le rendement optimal de 94 % est obtenu pour une quantité de 108 mg/l de Mg^{2+} ajouté.
- 600 mg/l, le rendement optimal de 95 % est obtenu pour une quantité de 108 mg/l de Mg^{2+} ajouté.

De même que pour les ions HCO_3^- , la teneur croissante en Mg^{2+} provoque un abaissement de l'efficacité d'élimination. Ceci pouvant s'expliquer par le fait que le PH diminue par suite de l'importance de la réaction d'hydrolyse :



La conductivité prend une valeur très élevée en raison de l'augmentation de la concentration en ions Mg^{2+} et Cl^- de l'eau traitée.

3 - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA DEFLUORURATION A LA CHAUX D'UNE EAU NATURELLE.

Les eaux des forages albiens de la région de Touggourt sont caractérisées par des températures élevées, il est donc important de tenir compte de l'influence de ce facteur sur la défluoruration à la chaux par précipitation chimique de ces eaux.

L'augmentation de la température peut modifier certains phénomènes physiques d'un traitement chimique des eaux, à savoir :

- augmenter la diffusion des réactifs.
- accélérer la vitesse des réactions chimiques.
- faciliter la formation des flocons, (augmentation du mouvement brownien) et leur décantation, (diminution de la viscosité de l'eau).

En effet, l'équilibre d'un système dépend de la température, de la pression et de sa composition initiale. Si l'un de ces facteurs varie, les proportions des substances à l'équilibre seront modifiées, on dit qu'il y a déplacement de l'équilibre, (dans le sens \rightarrow ou \leftarrow).

Cependant, il est important de savoir dans notre cas de traitement dans quel sens l'équilibre des réactions de précipitation se déplace suite à la variation du facteur température. Pour cela, nous avons établi le tracé de la courbe de rendement en fonction de $1/T$ pour des températures de l'eau naturelle ramenées à 59° C, 20° C et 6° C. La tangente de cette courbe nous permettra de déterminer le signe de l'enthalpie de réaction et par conséquent le sens de déplacement de l'équilibre de réaction. (T = température).

.../...

Si :

- $\Delta H > 0$, le déplacement d'équilibre se fait dans le sens \rightarrow endothermique, (5).
- $\Delta H < 0$, le déplacement a lieu dans le sens inverse \leftarrow , donc est encore endothermique, (5).

Les valeurs sont données sur le tableau suivant :

- Pour une dose de chaux de 300 mg/l.

| T° C | 1/T | Teneur résiduelle en F ⁻ (mg/l) | Rendement |
|-------|-------|---|-----------|
| 59° C | 0,017 | 0,31 | 85 % |
| 20° C | 0,05 | 0,46 | 56 % |
| 6° C | 0,168 | 0,58 | 44 % |

- Méthode d'essai :

Les essais ont été réalisés sur une eau naturelle de forage, pour différentes doses de chaux. Les échantillons de cette eau ont été portés à une température égale à 59° C. Par la suite, le procédé de dé-fluoruration à la chaux a été effectué comme précédemment et avec les mêmes conditions opératoires.

Les résultats sont donnés dans le tableau n° 9.

.../...

TABLEAU N° 9

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE T° SUR LA DEFLUORURATION

A LA CHAUX D'UNE EAU NATURELLE

PH initial = 7,2

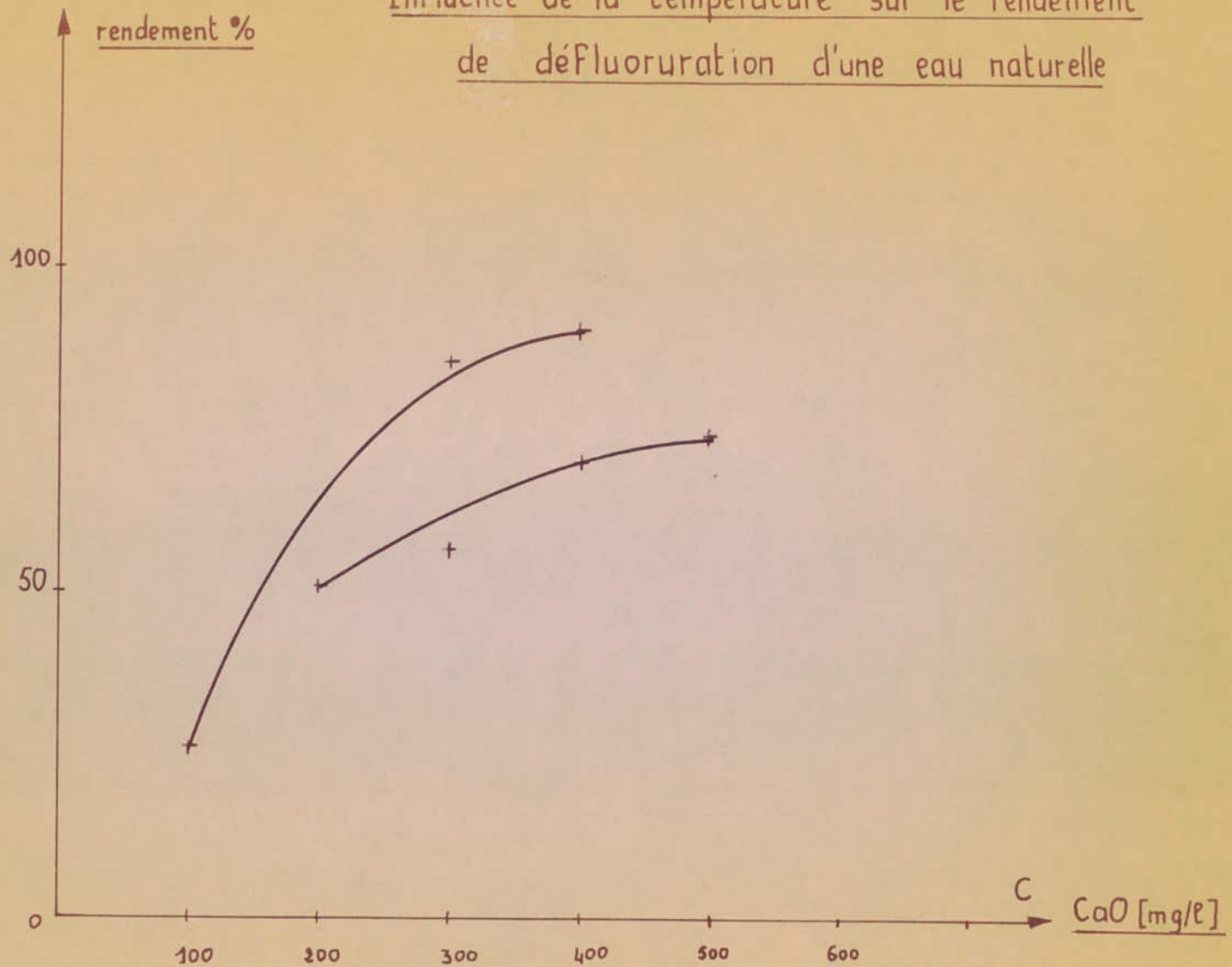
Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Résultats expérimentaux :

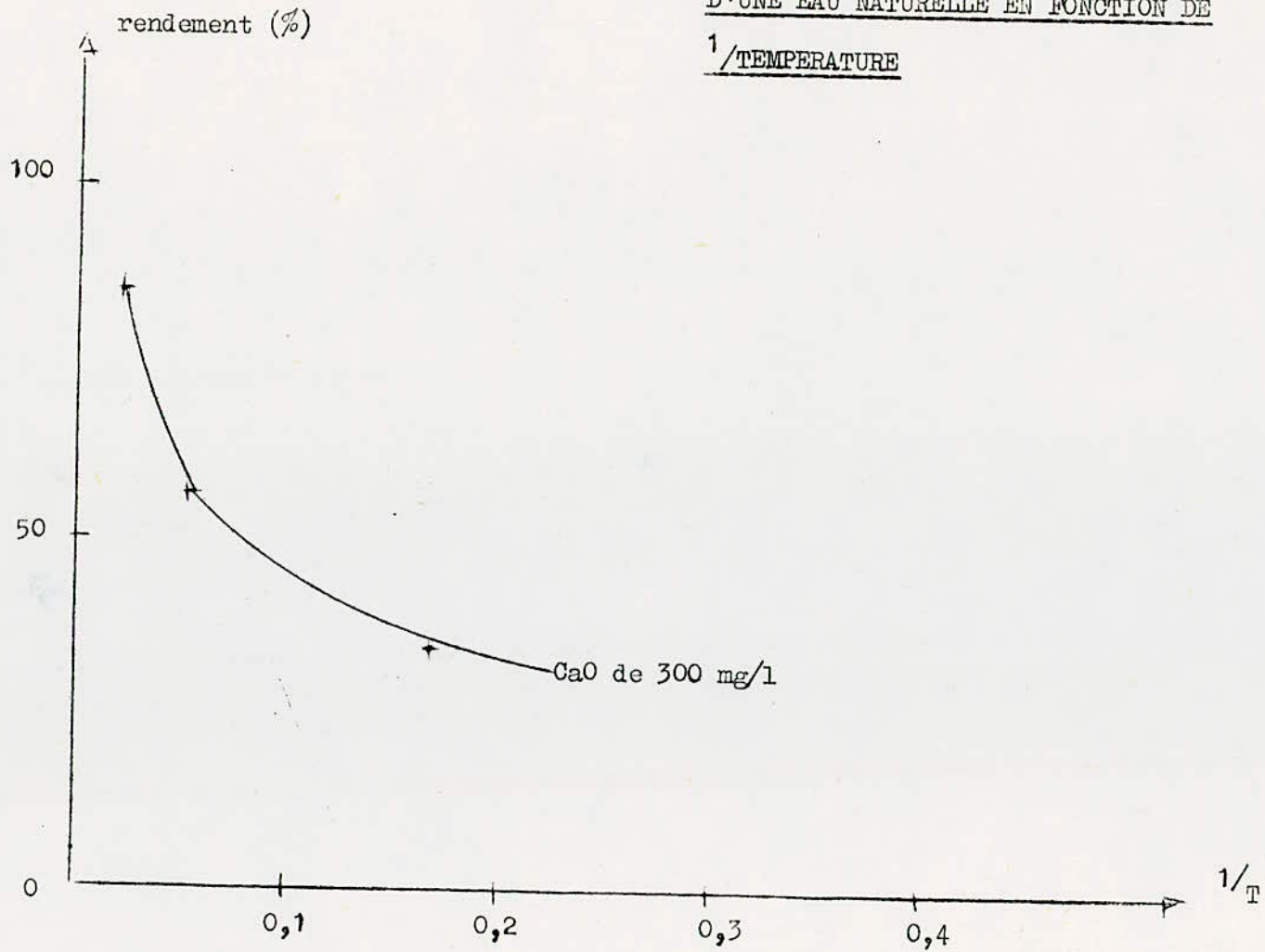
| QUANTITE DE REACTIF (mg/l) | APRES DECANTATION | | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------|--|------|-----------|
| | T° (°C) | Conductivité en mm hos à 25° C | Teneur résiduelle en F ⁻ (mg/l) | PH | Rendement |
| Ca O 100 | 59 | 3,16 | 0,49 | 8,0 | 52 % |
| 100 | 20 | 3,07 | 0,77 | 8,2 | 25 % |
| 300 | 59 | 3,86 | 0,15 | 8,8 | 85 % |
| 300 | 20 | 3,55 | 0,47 | 10,1 | 55 % |
| 400 | 59 | 3,98 | 0,1 | 9,1 | 90 % |
| 400 | 20 | 3,55 | 0,31 | 10,1 | 70 % |

Influence de la température sur le rendement
de défluoruration d'une eau naturelle



-56-

COURBE DE RENDEMENT DE DEFLUORURATION
D'UNE EAU NATURELLE EN FONCTION DE
1/TEMPERATURE



- Interprétation des résultats :

La comparaison des rendements obtenus à température de 59° C et à température ambiante de 20° C, nous a permis de constater une nette amélioration du rendement d'élimination du fluor lorsque la température est élevée.

Par hypothèse, nous attribuons cette amélioration à une plus grande diffusion du réactif et des ions fluorures, due à l'élévation de la température. Par conséquent, le contact entre les fluorures et les micro-cristaux actifs est plus rapide et important.

L'élévation de la température déplace l'équilibre calco-carbonique, donc la précipitation de CaCO_3 est importante, sa solubilité, (S), varie très peu avec l'accroissement de la température :

- à 25°C S = 0,014 mg/l de CaCO_3

- à 78°C S = 0,018 mg/l de CaCO_3

L'élévation de la température diminue également la solubilité des hydroxydes, (16) et par conséquent, l'amélioration du rendement peut être due en partie à une adsorption des ions fluorures sur les précipités de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ formés.

Néanmoins, la solubilité des autres sels croît avec la température, (5), (probablement celle de CaF_2), ceci s'est vu vérifié par la valeur de l'enthalpie de dissolution, qui est positive, et comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, (5), cela implique une dissolution des sels. L'augmentation de la conductivité le confirme.

En conclusion, l'élévation de la température accroît énormément les vitesses de formation de germes et le grossissement des cristaux, (16); d'où l'amélioration de l'efficacité de traitement.

Ces résultats nous permettent également de définir le meilleur emplacement de l'unité de traitement, qui serait plus rentable en tête de forage que située après refroidissement de l'eau.

4 - INFLUENCE DU PH SUR LA DEFLUORURATION A LA CHAUX D'UNE
EAU NATURELLE.

Le rôle primordial du PH a été mis en évidence expérimentalement depuis longtemps, (18). Pour chaque nature d'eau à traiter, il existe une valeur optimale du PH, dont la détermination ne peut se faire qu'expérimentalement.

Le PH joue également un rôle important dans le domaine de la précipitation des ions.

L'étude de l'influence du PH, nous permettra peut-être de confirmer les suppositions déjà faites auparavant. Entre autres, celle qui fait correspondre le PH de précipitation de la magnésie au PH de rendement optimum de défluoruration par précipitation à la chaux.

-- Méthode d'essai :

L'influence du PH a été étudiée pour une quantité de chaux égale à 400 mg/l, l'alcalinisation étant assurée par NaOH.

La chaux et NaOH sont ajoutés en même temps dans les échantillons d'essai de 200 ml d'eau de forage à traiter et ce, pendant l'agitation rapide.

Le PH, la conductivité et le rendement de l'opération ont été mesurés après décantation.

Les résultats sont donnés dans le tableau n° 10.

TABLEAU N° 10 : INFLUENCE DU PH SUR LA DEFLUORURATION A LA CHAUX
D'UNE EAU NATURELLE

Dose de chaux : 400 mg/l

PH initial = 7,2

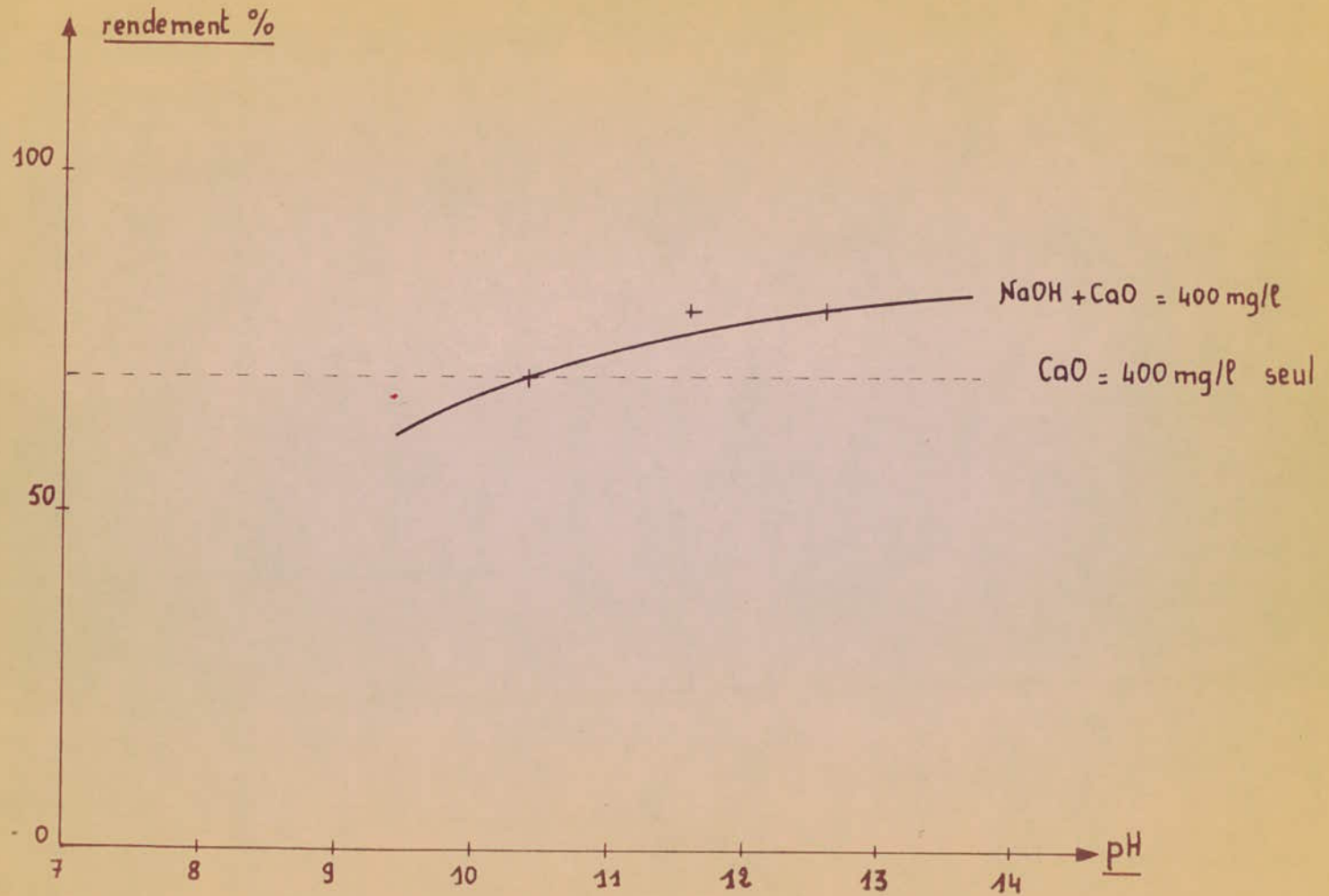
Conductivité initiale = 4,35 m nhos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | |
|------------------------------|------|-------------------|--------------------------------|--|-----------|
| CaO | NaOH | PH | CONDUCTIVITE EN m nhos A 25° C | TENEUR RESIDUELLE EN F ⁻ (mg/l) | RENDEMENT |
| 400 | - | 10,1 | 3,55 | 0,31 | 70 % |
| 400 | 100 | 10,4 | 3,74 | 0,31 | 70 % |
| 400 | 200 | 11,5 | 5,15 | 0,17 | 83 % |
| 400 | 2000 | 12,7 | 8,82 | 0,20 | 80 % |

Influence du pH sur la défluoruration à la Chaux d'une eau naturelle



-64-

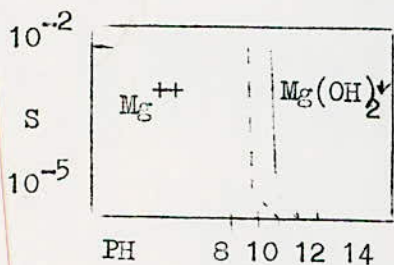
- Interprétation des résultats :

Les résultats repris au tableau n° 10, montrent que les meilleurs rendements sont obtenus à $\text{PH} > 10,4$. Le rendement optimal étant obtenu à $\text{PH} = 11,5$, (80 %).

Pour les valeurs de PH supérieures à 12, le rendement de défluoruration diminue. Ceci s'explique par le fait qu'à PH basique, il y a redissolution des précipités et que la précipitation des ions est limitée à un domaine bien défini de PH .

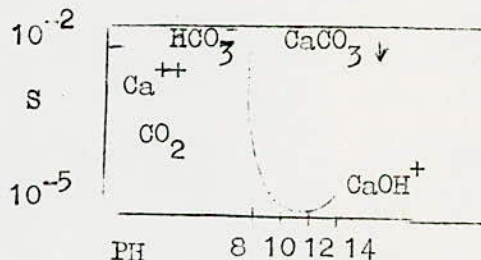
$\text{Mg}(\text{OH})_2$ a un début de précipitation à $\text{PH} = 10,6$ et une fin de précipitation vers $\text{PH} = 12$ (16)

La redissolution de CaCO_3 se produit à $\text{PH} > 12$ (16)



SOLUBILITE APPARENTE DE
L'HYDROXYDE DE MAGNESIUM
EN FONCTION DU PH

SOLUBILITE APPARENTE DU
CARBONATE DE CALCIUM EN
FONCTION DU PH



Nous déduisons qu'à $\text{PH} > 12$, les phénomènes d'adsorption et d'entraînement des fluorures par précipitation, ne sont plus réalisables dans ce cas de traitement.

Nous constatons également que le PH de rendement optimal est compris dans le domaine de stabilité de la magnésie, (10,6 - 12).

La valeur élevée de la conductivité est due aux ions sodium ajoutés par l'intermédiaire de NaOH et à la redissolution des précipités.

5 - INFLUENCE DE L'ADDITION DES ADJUVANTS DE COAGULATION A UNE EAU NATURELLE A TRAITER PAR PRECIPITATION CHIMIQUE A LA CHAUX

La teneur résiduelle en fluor de l'eau naturelle obtenue par précipitation chimique à la chaux apparaît conforme aux normes de potabilité. Mais on pourrait penser à améliorer le rendement de l'opération en utilisant des adjuvants de coagulation tels que le sulfate d'alumine et le chlorure ferrique.

Utilisés avec la chaux, la combinaison est favorable à la décantation, (17). On effectue alors des essais de défluoruration en utilisant comme adjuvant le sulfate d'alumine et le chlorure ferrique combinés avec la dose optimale de 600 mg/l de chaux et une autre de 400 mg/l.

-- Méthode d'essai :

La dose de chaux est introduite comme précédemment. Après 20 secondes d'agitation rapide, on rajoute dans l'eau à traiter la dose de coagulant, également en solution.

Les résultats sont donnés dans les tableaux n° 12, 13, 14 et 15.

TABIEAU N° 12

ESSAIS DE DEFLUORURATION D'UNE EAU NATURELLE A LA CHAUX

ET AU SULFATE D'ALUMINE

Dose de chaux : 600 mg/l

Dose de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16 H_2O$: 20 mg/l, 40mg/l, 60 mg/l, 80 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|-----------|
| Ca O | $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16 H_2O$ | PH | Conductivité en mm hos à 25° C | Teneur résiduelle en F^- (mg/l) | Rendement |
| 600 | - | 10,2 | 3,63 | 0,20 | 81 % |
| 600 | 20 | 10,2 | 2,89 | 0,16 | 84 % |
| 600 | 40 | 10,05 | 2,86 | 0,16 | 84 % |
| 600 | 60 | 9,9 | 2,85 | 0,13 | 87 % |
| 600 | 80 | 9,2 | 2,75 | 0,19 | 81 % |

TABLEAU N° 13

ESSAIS DE DEFLUORURATION D'UNE EAU NATURELLE A LA CHAUX
ET AU SULFATE D'ALUMINE

Dose de chaux : 400 mg/l

Dose de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$: 20 mg/l, 40 mg/l, 60 mg/l, 80 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/L

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | |
|---------------------------------|--|----------------------|--------------------------------------|--|-----------|
| Ca O | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$ | PH | Conductivité en mm hos à 25° C | Teneur résiduelle en F^- (mg/l) | Rendement |
| 400 | - | 10,1 | 3,55 | 0,31 | 70 % |
| 400 | 20 | 9,8 | 2,96 | 0,40 | 61 % |
| 400 | 40 | 9,6 | 2,94 | 0,40 | 61 % |
| 400 | 60 | 9,1 | 2,91 | 0,33 | 68 % |
| 400 | 80 | 8,6 | 2,89 | 0,33 | 68 % |

Essai de défluoruration d'une eau naturelle

au $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ + Chaux

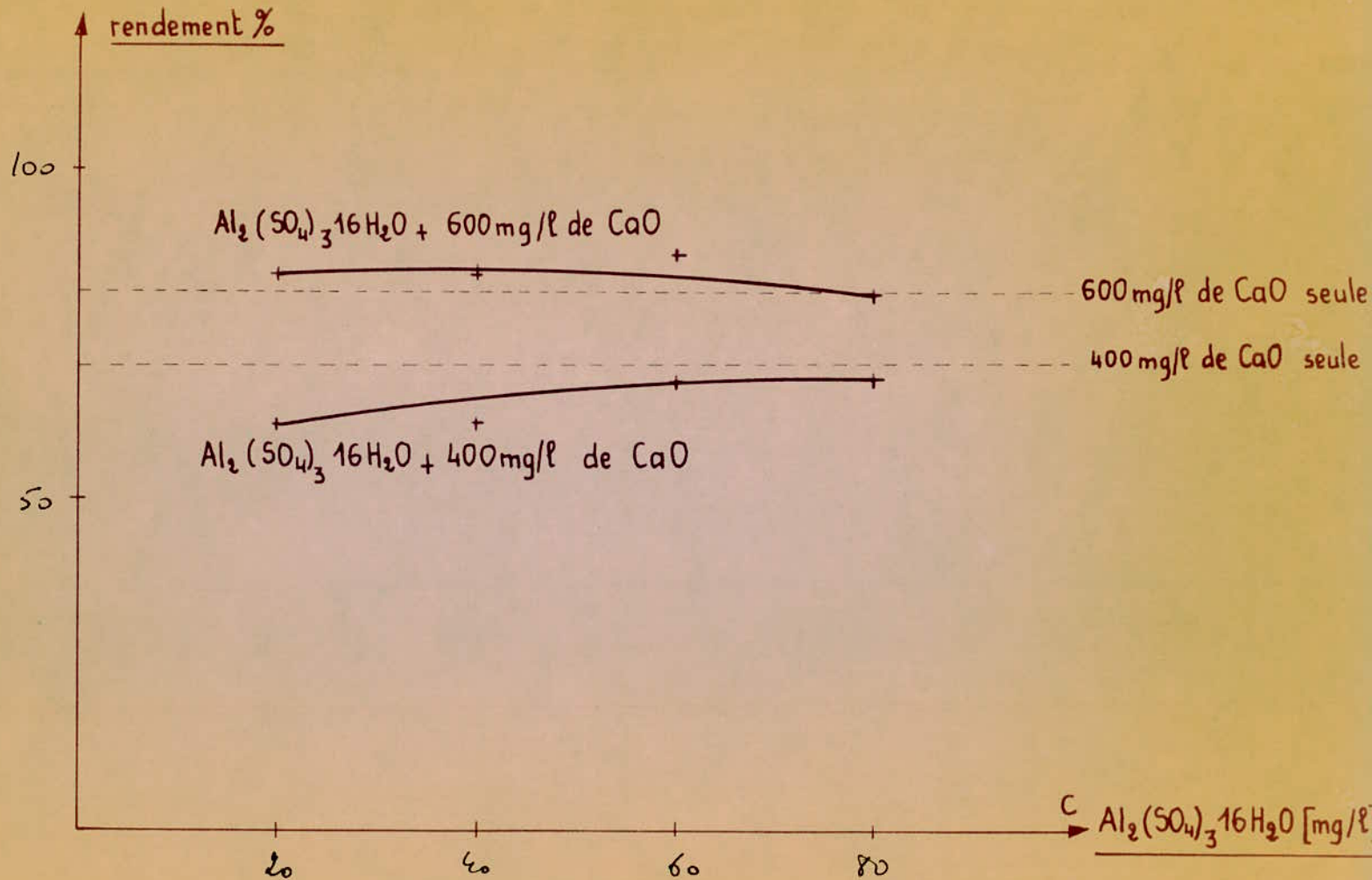


TABLEAU N° 14

ESSAIS DE DEFLUORURATION D'UNE EAU NATURELLE

AU Fe Cl₃ 6H₂O + CHAUX

Dose de chaux : 600 mg/l

Dose de Fe Cl₃ 6H₂O : 20 mg/l, 40 mg/l, 60 mg/l, 80 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--|-----------|
| Ca O | FeCl ₃ 6H ₂ O | PH | Conductivité en mm hos à 25° C | Teneur résiduelle en F ⁻ (mg/l) | Rendement |
| 600 | - | 10,2 | 3,63 | 0,20 | 81 % |
| 600 | 20 | 9,6 | 3,88 | 0,19 | 81 % |
| 600 | 40 | 9,2 | 3,94 | 0,36 | 65 % |
| 600 | 60 | 9,1 | 4,06 | 0,45 | 66 % |
| 600 | 80 | 7,6 | 4,34 | 0,66 | 36 % |

TABLEAU N° 15

ESSAIS DE DEFLUORURATION D'UNE EAU NATURELLE A LA

CHAUX ET AU $\text{Fe Cl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

Dose de chaux : 400 mg/l

Dose de $\text{Fe Cl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$: 20 mg/l, 40 mg/l, 60 mg/l, 80 mg/l

PH initial = 7,2

Conductivité initiale = 4,35 mm hos à 25° C

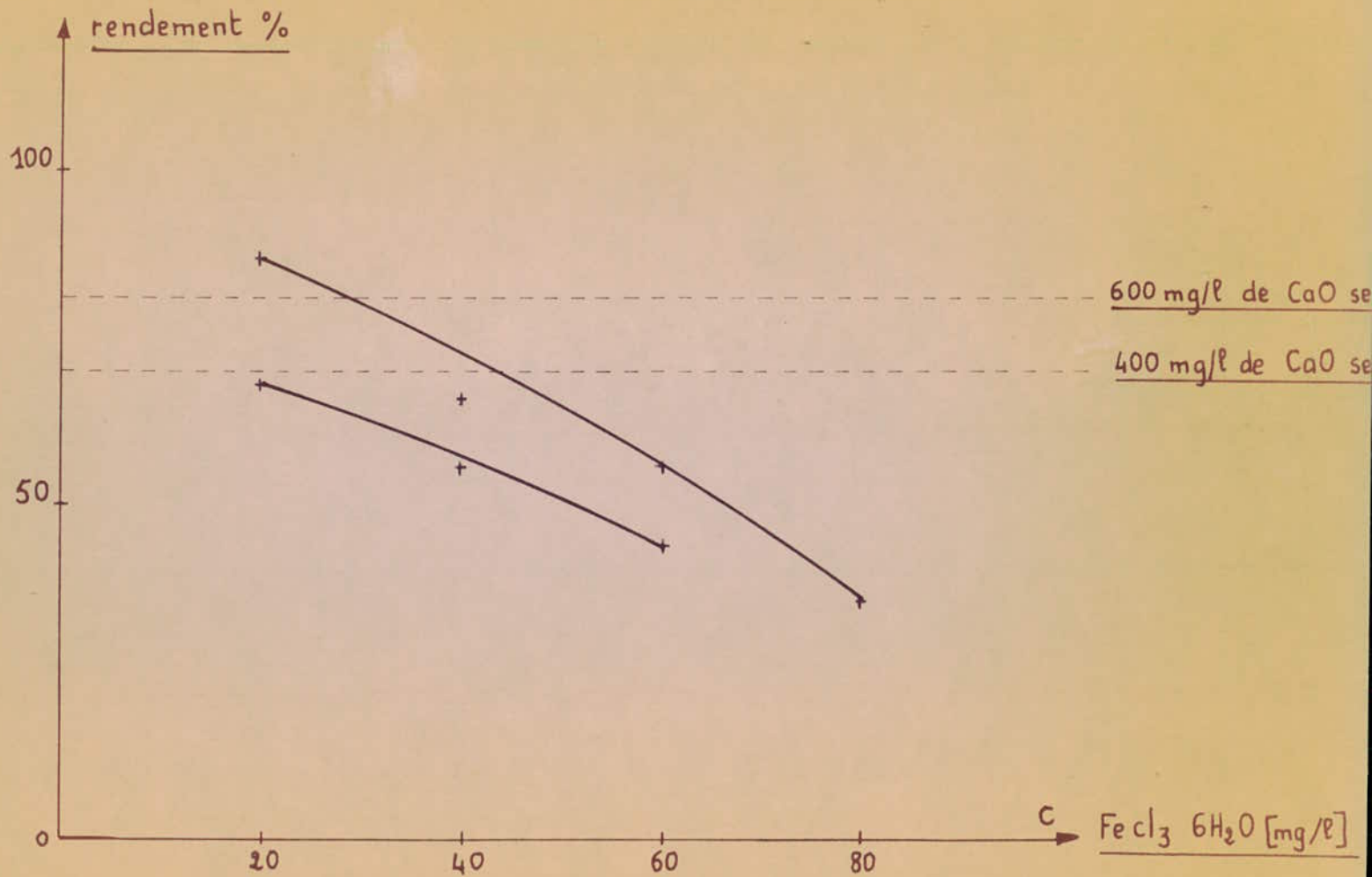
Teneur en fluor initiale = 1,04 mg/l

Résultats expérimentaux :

| QUANTITES DE REACTIFS (mg/l) | | APRES DECANTATION | | | |
|------------------------------|---|-------------------|----------------------------|--|-----------|
| Ca O | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | PH | Conductivité mm hos à 25°C | Teneur résiduelle en F^- (mg/l) | Rendement |
| 400 | - | 10,1 | 3,55 | 0,27 | 51 % |
| 400 | 20 | 8,8 | 3,49 | 0,33 | 68 % |
| 400 | 40 | 8,3 | 3,62 | 0,45 | 56 % |
| 400 | 60 | 7,8 | 3,76 | 0,58 | 44 % |
| 400 | 80 | 7,1 | 3,99 | 0,58 | 44 % |

Essai de défluoruration d'une eau naturelle

au $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + Chaux



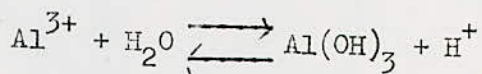
43-

- Interprétation des résultats :

Le rendement de défluoruration obtenu pour la dose optimale de 600 mg/l de CaO a été amélioré tout particulièrement par ajout de 60 mg/l de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$. L'action de cet adjuvant consisterait à favoriser la coagulation des fins cristaux résultants des réactions d'adoucissement.

Il pourrait cependant paraître illogique d'utiliser du sulfate d'aluminium à $PH > 4$, ($PH = 4$ de précipitation de $Al(OH)_3$, (16)), mais notre but est d'obtenir de l'aluminate de magnésium afin de mieux précipiter le magnésium, (14), compte tenu du fait qu'à $PH > 10$, c'est AlO_2^- qui prédomine.

Le PH baisse par suite des réactions d'hydrolyses :



Dans le cas du coagulant $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, à la dose optimale de 600 mg/l, le rendement reste inchangé pour une dose de 20 mg/l de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ et baisse pour des doses supérieures à celle-ci.

Dans ce cas de traitement, le PH relativement peu basique ne favorise pas la précipitation des autres sels ou hydroxydes, d'où une diminution de l'efficacité de traitement.

L'augmentation de la force ionique par les ions apportés par les coagulants, provoque la redissolution des précipités et de ce fait, la conductivité augmente.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION SUR LA PARTIE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a été quelque peu réduite, en raison du temps qui nous a été imparti pour la réalisation de notre étude et à défaut de moyens appropriés.

En effet, un dimensionnement d'une unité de traitement ne serait possible, sans une étude en continu sur une eau naturelle, ce qui permettrait une meilleure observation de l'efficacité de traitement et de déterminer les paramètres de base pour le dimensionnement.

Néanmoins, l'essai de défluoruration à la chaux nous a permis de déterminer la dose optimale de 600 mg/l de CaO pour un rendement de 80 %.

Nous avons également pu constater l'influence positive des ions Mg^{2+} et HCO_3^- , et de la température. La température a été surtout prise en compte dans le but de déterminer le meilleur emplacement de l'unité de traitement et donc de reproduire les conditions dans lesquelles se ferait en pratique le traitement des eaux de la région étudiée.

L'étude de l'influence des coagulants sur le traitement, a été positive pour l'adjuvant coagulant $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16 H_2O$. Toutefois, l'utilisation de coagulant-floculant présente nombre d'inconvénients, notamment, la modification des caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter, (variation de PH, de la conductivité, présence de cations).

Un autre problème se pose également au niveau de l'épaississement des boues. Les hydroxydes de fer et d'aluminium décantent en floes très lâches et très hydrophiles qui s'épaississent mal, (17).

CHAPITRE 5 : ETUDE SOMMAIRE D'UN DIMENSIONNEMENT

1 - MECANISME DE DECANTATION :

Considérons un bassin cylindrique à axe vertical, à fond horizontal de section $S = \pi \frac{D^2}{4}$, et de hauteur H , par le fond duquel arrive d'une façon continue, en régime permanent un débit Q d'eau à décanter; uniformément réparti sur toute la surface de la section du bassin.

Il en résulte que la vitesse ascensionnelle de l'eau à l'intérieur du bassin est égale à $Z = \frac{Q}{S}$



Une particule quelconque M du flocculat, située dans la masse d'eau traversant le bassin vertical, est soumise de bas en haut à l'action de cette vitesse. De plus, du fait de sa masse elle est soumise à une vitesse verticale V dirigée de haut en bas. Cette vitesse V peut être mesurée ou calculée par la loi de Stokes.

Il est évident que :

- si $V < Z$, cette particule ne décantera pas et, sera entraînée par le courant, elle passera avec le flux ascendant au-dessus du bord supérieur du bassin.
- pour qu'il y ait décantation, il faut que $V \geq Z$.

2 - DECANTEUR-FLOCCULATEUR SIMPLE.

Dans le cas d'un flocculateur-décanteur combiné, à flux ascendant, il y aura lieu à défaut des résultats expérimentaux, de se rapporter dans les mêmes conditions de $S = \frac{Q}{2,5}$ (19)

Application pour la ville de Touggourt :

- la capacité à l'horizon 2.000 a été estimée à $1.080 \text{ m}^3/\text{h} = Q$
- la surface sera définie ainsi par $\frac{Q}{2,5} = \frac{1.080}{2,5} = 432 \text{ m}^2$
- le diamètre $D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 23 \text{ m}$
- la vitesse surverse $Z = \frac{Q}{S} = 2,5 \text{ m/s}$

Mesure de la vitesse "V" de décantation :

La méthode de mesure utilisée est celle décrite sur "Méthode d'analyse, (D)", sur un échantillon d'eau naturelle de forage traitée à dose optimale de chaux.

La vitesse ainsi trouvée indique la vitesse ascensionnelle qu'il serait théoriquement possible d'admettre dans un décanteur industriel.

Résultats :

- * hauteur de l'éprouvette correspondant à 10 ml = A = 9,70 mm.
- * volume d'eau naturelle introduit en une minute pour maintenir la couche supérieure de boue au niveau du liquide placé dans l'éprouvette, (250 ml) :
B = 100 ml
- * vitesse théorique de sédimentation en mètre par heure : $\frac{0,6 \text{ AB}}{1.000} = V = 0,6 \text{ m/h}$

- Mesure du volume de boue :

Le volume de boue a été mesuré dans un " cône Imhoff ", sur un litre d'eau naturelle à traiter à la dose optimale de 600 mg/l.

Le volume trouvé est de 30 l/m³.

Conclusion :

La condition de décantation n'est pas vérifiée, la vitesse V mesurée étant inférieure à Z .

Les particules en suspension ne décanteront pas et seront entraînées.

Ceci nous a donc amené à faire un autre choix de décan-
teur, qui permet d'adopter des vitesses ascensionnelles importantes,
il s'agit du type "PULSATOR".

3 - FULSATOR :

Ce sont des appareils à lit de boue proprement dit. La boue est maintenue sous forme d'une masse en suspension que l'eau peut traverser de bas en haut, d'une façon régulière.

Le brassage est réalisé au niveau de l'introduction de l'eau à traiter.

Le pulsator permet d'augmenter la vitesse de circulation de l'eau et d'adopter une surface de décantation égale au débit horaire divisé par 4 à 6.

On opte pour une surface = $\frac{\text{débit horaire}}{5}$

- débit horaire du forage albien (Q)

$$Q = 1080 \text{ m}^3/\text{h.}$$

- surface de décantation = $\frac{Q}{5} = 216 \text{ m}^2$

- diamètre (D) = 16,5 m

- quantité optimale de chaux = 600 g/m^3

CHAPITRE 6 : DESCRIPTION DE LA FILIERE DE TRAITEMENT

1 - MELANGEUR RAPIDE.

Il s'agit d'un mélangeur rapide du type à hélice ou à pale, (turbine), mis en place dans une chambre de mélange spéciale.

Le mélangeur rapide n'est pas indispensable, lorsque l'on utilise un décanteur à contact.

2 - FLOCCULATION.

La floculation est ici effectuée dans des bassins munis de systèmes d'agitation qui tournent relativement lentement, pour ne pas briser les flocons déjà formés, mais suffisamment vite pour assurer le grossissement progressif du floc. Et ainsi, empêcher le dépôt de sédimenter sur le fond du bassin.

Il est souhaitable de pouvoir obtenir, dans le flocculateur un gradient de vitesse compris entre 20 et 50 S^{-1} .

Industriellement, la floculation est obtenue par les hélico-agitateurs, les pales de brassage, ...

Les appareils sont utilisés facilement, mais il faut prendre soin d'éviter absolument toute chute de variation de vitesse excessive de l'eau entre le flocculateur et le bassin de décantation.

Afin de ne pas briser les flocons formés lors de leur transfert du flocculateur à la zone de décantation, la liaison entre le flocculateur et le décanteur doit donc se faire par des canaux à très large section, sous peine de rendre la floculation inopérante.

On tend de plus en plus, pour cette raison à combiner la floculation et la décantation dans le même appareil.

3 - DECANTATION.

La décantation a pour but de permettre le dépôt des particules en suspension dans l'eau, soit que ces particules existent dans l'eau brute, soit qu'elles résultent de l'action d'un réactif chimique ajouté artificiellement, (coagulation, épuration chimique, ...).

Dans le cas des eaux de consommation et lorsque le traitement comporte une addition de réactifs, on a intérêt à combiner la floculation et la décantation dans un appareil unique.

Car ceci permet l'obtention de réactions complètes avec les précipités. On peut alors augmenter considérablement la vitesse de circulation de l'eau et adopter une surface de décanteur égale au débit horaire divisé par 4 à 6, suivant le type de décanteur utilisé. (10)

4 - RECARBONATATION.

Dans notre cas de traitement, le PH de l'eau traitée est très élevé. La recarbonatation est de ce fait nécessaire. Elle consiste à ajouter du gaz carbonique à l'eau, pour obtenir une diminution de PH jusqu'à une valeur de 8 à 8,5.

5 - EVACUATION DES BOUES.

Les procédés d'épuration des eaux déplacent la pollution d'une phase liquide, (solutés et matières en suspension), vers une phase plus ou moins solide, "les boues".

Les boues sont constituées de produits de précipitation et de réactifs de traitement, (floculants). La composition chimique et l'aspect physique des boues dépendent de la nature de l'influent à l'entrée de la station et des procédés d'épuration qui ont conduit à leur formation; selon les cas, elles seront plus ou moins grenues, minérales, organiques,...

Le choix d'une chaîne de traitement appropriée dépendra à la fois de la nature des boues, (donc des procédés en amont), et de leur destination ultime : incinération, décharge, épandage agricole, (donc des procédés en aval).

Les contraintes économiques telles que la disponibilité de terrains et d'énergie seront également déterminantes. Néanmoins, dans les régions du Sud Algérien, ces contraintes ne se posent pas.

Dès lors, il apparaît que le traitement des boues le plus approprié serait, le "séchage naturel" sur des aires ou "lits de séchage", après épaissement. Par la suite, les boues séchées seraient mises en décharge.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les essais réalisés au cours de notre étude sur différents procédés et techniques de défluoruration, nous ont permis de porter notre choix sur la méthode de défluoruration par précipitation à la chaux et ceci compte tenu :

- 1 - des caractéristiques chimiques de l'eau de la région de Touggourt, (richesse en magnésium, température et dureté élevées).
- 2 - de l'aspect économique du procédé.

L'importance de la composition chimique de cette eau, dans le procédé de défluoruration à la chaux, a été vérifiée par les quelques essais réalisés pour confirmer l'influence favorable des ions Mg^{2+} et HCO_3 sur l'efficacité du traitement.

La conception d'une unité de défluoruration par précipitation chimique à la chaux, apparaît comme ayant un seul intérêt, mais néanmoins important au niveau de la santé publique, à savoir l'élimination des fluorures des eaux de boisson de la région de Touggourt.

En effet, les eaux des forages albiens de cette région présentent une forte minéralisation et les autres minéraux doivent donc être partiellement ou totalement éliminés pour des raisons de santé moins graves, de goût et de protection des tuyauteries de distribution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - RAMON S. ET RICOUR J. : "La présence du fluor dans les eaux souterraines, d'après des exemples français" Technique et sciences municipales, l'eau. Novembre 1978
- 2 - BELKACEM AZOUT : "Contribution à la recherche des causes de fluoroses d'origine alimentaire dans la région d'El Oued". I.N.A. - M.E.R.S. DZ Projet de fin d'études, 1972.
- 3 - AROUA A. (Dr.) : "Problèmes de santé liés à l'hyperminéralisation de certaines eaux en Algérie". Séminaire O.M.S. - M.E.R.S. sur la technologie appropriée à la déminéralisation de l'eau potable, novembre 1981.
- 4 - HARRISSON T.R. : "Principe de médecine interne". Editions Flammarion, 1972.
- 5 - SOUCHAY P. : "Chimie générale, thermodynamique chimique". Editions Masson et Cie, 1964.
- 6 - U.N.E.S.C.O. : "Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional". 1972.

.../...

- 7 - I.N.R.H, BIRMANDREIS : "Analyses du laboratoire de chimie"
Janvier 1982.
- 8 - GIROULT M. : "Séminaire sur les technologies appropriées
à la déminéralisation de l'eau potable".
Séminaire O.M.S. - M.E.R.S. 1982.
- 9 - NADJAH A. (Dr.) : "Le Souf des Oasis". Maison des Livres,
Alger, 1971.
- 10 - DEGREMONT : "Memento technique de l'eau". Technique
et documentation, 1978.
- 11 - RODIER J. : "L'analyse de l'eau". Dunod, 1978.
- 12 - BULUSU K.R. : "Fluorides in water, defluoridation methods
and their limitations". Journal of the
Institution of Engineers. India, october
1979.
- 13 - GOMELLA C. ET
GUERREE H. : "Le traitement des eaux publiques indus-
trielles et privées". Eyrolles, 1978.
- 14 - COX G.R. : "Technique et contrôle du traitement des
eaux". O.M.S., série de monographies, n°
49, 1967.

.../...

- 15 - BIVER C. ET DEGOLS A. : "Épuration physico-chimique des effluents fluorés par le chlorure de calcium".
Technique de l'eau et l'assainissement,
n° 428/429, août/septembre 1982.
- 16 - CHARLOT G. : "Les méthodes de la chimie analytique".
Editions Masson et Cie, 1961.
- 17 - DEGREMONT : "Memento technique de l'eau".
Ets. Emile Degremont, 1968.
- 18 - PIRNAY M. ET : "Les procédés de traitement des eaux usées".
SCHWACHHOFER G. Bureau d'études, Charleroi - Belgique,
avril 1978.
- 19 - ANTROPOV I. : "Electrochimie théorique".
Editions de Moscou.
- 20 - MEZGHRANI S. : "Défluoruration d'une eau de consommation
par précipitation chimique à la chaux".
E.N.P.A. - U.S.T.H.B. - M.E.R.S. - DZ
Projet de fin d'études, juin 1982.
- 21 - GILLET G. & : "Construction technique de l'ingénieur".
GENES P.H.

