

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie de l'Environnement

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET

DE FIN D'ETUDES

THEME

**Défluoruration Par Electro-Adsorption
A l'aide d'une Colonne d'Alumine Activée**

Proposé par
N. Mameri

Etudié par
M. Chelghoum

Dirigé
A. Namane
H. Lounici

soutenu devant le Jury

N. Mameri
M. Derouiche
S. Bouchtaoui
A. Mazighi
A. Namane
H. Lounici

Maitre de Conférences
Chargé de Cours
Chargée de Cours
Assistant
Maitre Assistant
Maitre Assistant

| | |
|--------------|------|
| Président | ENP |
| Examinateur | ENP |
| Examinatrice | ENP |
| Examinateur | ENP |
| Rapporteur | ENP |
| Rapporteur | ICTO |

Promotion : 1994

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie de l'Environnement

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET

DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
THEME

Défluoruration Par Electro-Adsorption A l'aide d'une Colonne d'Alumine Activée

Proposé par
N. Mameri

Etudié par
M. Chelghoum

Dirigé
A. Namane
H. Lounici

soutenu devant le Jury

N. Mameri
M. Derouiche
S. Bouchtaoui
A. Mazighi
A. Namane
H. Lounici

Maitre de Conférences
Chargé de Cours
Chargée de Cours
Assistant
Maitre Assistant
Maitre Assistant

| | |
|--------------|------|
| Président | ENP |
| Examineur | ENP |
| Examinatrice | ENP |
| Examineur | ENP |
| Rapporteur | ENP |
| Rapporteur | ICTO |

Promotion : 1994



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail à :
mes parents
à Fatima
mes frères et soeurs
à mes beaux frères
à mes cousins et cousines
mes tantes
et à tous ceux qui me sont chers.

Mustapha

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Dr N. MAMERI , mon promoteur pour m'avoir aidé à réaliser cette étude , pour m'avoir aidé à réaliser cette étude, pour l'honneur qu'il m'a fait en m'acceptant dans son laboratoire et enfin pour ces conseils et les critiques concernant ce modeste travail .

De même , je remercie Mrs AeK NAMANE et H. LOUNICI pour m'avoir accepté de diriger ce présent mémoire , pour toute l'aide et les conseils prodigués ainsi que leur disponibilité à tout moment.

Sans toutefois oublier , les membres du Jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

N . MAMERI Président

M. DEROUICHE Examineur

A. MAZIGHI Examineur

S. BOUCHTAOUI Examinatrice

A. NAMANE Rapporteur

H. LOUNICI Rapporteur

Je remercie également R. YEDDOU pour son soutien morale et son aide précieuse , ainsi que FARID. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce modeste travail , ma profonde gratitude.

SOMMAIRE



Avant Propos

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre un : Généralités Sur le Fluor

| | |
|-------|---|
| I.1 | Le fluor dans la nature |
| I.2 | Effets des fluorures sur les être vivants |
| I.2.1 | Effets sur l'Homme. |
| I.2.2 | Effets sur les animaux et la végétation |
| I.3 | Les teneurs optimales d'ions fluorures dans les eaux potables |
| I.4 | Fluoruration des eaux. |

Chapitre Deux : Les Eaux du Sud Algérien et le Problème de L'excès En Fluor

| | |
|------|--|
| II.1 | La fluorose en Algérie |
| II.2 | Les taux de fluor dans les nappes de Sud Algérien |
| II.3 | Caractéristiques chimiques et physico-chimiques des eaux de Sahara septentrional. |

Chapitre Trois : Méthodes De Défluoruration Des Eaux

| | |
|-------|--|
| III.1 | Élimination par précipitation |
| III.2 | Élimination par adsorption et échange d'ions |
| III.3 | Défluoruration par électrolyse |
| III.4 | Défluoruration par osmose inverse |
| III.5 | Défluoruration par électrodialyse |

Chapitre Quatre: Défluoruration Par Adsorption Sur L'alumine Activée.

| | |
|------|--|
| IV.1 | Définition de l'adsorption |
| IV.2 | Notion de l'adsorption sur colonne |
| IV.3 | Description de l'alumine activée |

Chapitre Cinq : Le traitement électrochimique des eaux

| | |
|-------|--|
| V.1 | Introduction |
| V.2 | Les effets du courant électrique |
| V.2.1 | Électrolyse |
| V.2.2 | Champ électrique |
| V.3 | Electrocoagulation-floculation |
| V.4 | Electrodétoxication |
| V.5 | Electrochloration |
| V.6 | Electrodécontamination |
| V.7 | Electroadsorption |

Chapitre Six : Généralités sur la modélisation

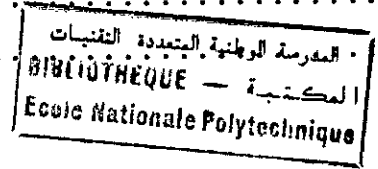
| | |
|--------|--|
| VI.1 | Introduction |
| VI.2 | Les modèles |
| VI.2.1 | Différents types de modèles |
| VI.2.2 | Procédure pour une approche analytique du modèle. |
| VI.3. | Formulations des modèles mathématiques. |
| VI.3.1 | Les plans d'expériences |
| VI.4 | Définition des effets principaux et des interactions |
| VI.5 | Interaction de deux facteurs |

PARTIE EXPÉRIMENTALE :

Chapitre Un : Mode Opérateur

| | |
|-----|---|
| I.1 | Appareillage |
| I.2 | Préparation de l'eau d'alimentation |

| | |
|-----|---------------------------|
| I.3 | Méthode d'analyse |
| I.4 | Paramètres d'études |



Chapitre Deux : Résultats & Discussions

| | |
|------|---|
| II.1 | Influence du champ électrique |
| II.2 | Influence de la hauteur du lit |
| II.3 | Influence du débit volumique |
| II.4 | Influence du TAC |
| II.5 | Effet du champ électrique sur la régénération |

Chapitre Trois : Etablissement du modèle

| | |
|-------|--|
| III.1 | Choix des paramètres |
| III.2 | Choix de la planification et programmation des expériences |
| III. | Choix des niveaux |
| III.4 | Résultats et discussion |

Conclusion

Bibliographie

Avant Propos

De toutes les substances nécessaires à la vie telle que nous la connaissons sur terre , l'eau est de loin la plus importante , la plus familière et la plus admirable ; et l'homme en a besoin non seulement à titre de boisson , mais aussi comme source d'énergie , moyen de transport et d'irrigation.

En Algérie , les problèmes de santé liés à la surcharge de certains caux aux sels minéraux , sont dominés par la fluorose que concerne toute la région de Sahara septentrional. En effet de très nombreux cas de fluoroses ont été décèlés parmi les habitants de cette région. Ajouté à ce fait , la sécheresse qui sévit ces dernières décennies au Sahara, d'une manière cruciale rend pratiquement l'approvisionnement des villes une entreprise ardue sinon complexe Un traitement des maigres ressources hydriques s'avère donc hautement nécessaire.

La technologie moderne exige de plus en plus d'eau , il faut sans cesse imaginer de nouveaux moyens d'accès à des ressources encore inutilisées , mettre au point de nouvelles méthodes pour pouvoir réemployer l'eau polluée par l'homme.

Pour cela , plusieurs études ont été entamées ces dernières années et ce dans la but de rechercher le procédé le plus économique et le plus efficace . Pour notre part , Nous avons opté pour la défluoruration par électro adsorption

Pour ce faire , nous avons suivi le plan travail résumé dans le sommaire de ce présent mémoire ;, dans la partie bibliographique , nous rappellerons quelques notions nécessaires pour la compréhension des phénomènes étudiés ainsi que les études antérieures.

Quant à la partie expérimentale , nous exposerons les procédé et l'appareillage utilisés dans nos expérimentations et les principaux résultats obtenus et nous finirons par un essai de modélisation de l'électro-adsorption.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Partie Bibliographique

CHAPITRE UN

Généralités Sur le Fluor

1.1 LE FLUOR DANS LA NATURE:

Le fluor est le dix-septième élément le plus abondant de la croûte terrestre . Du fait de sa très grande électronégativité , le fluor est le plus réactif de tous les éléments chimiques , et par conséquent, il ne se trouve jamais à l'état libre ou gazeux (F_2) [2].

On le rencontre surtout sous forme de fluorures ; CaF_2 de cryolithe $NaAlF_2$, et d'apatite de fluor $Ca_5F_2(PO_4)_3$. Ces minéraux étant quasi-insolubles dans la plupart des eaux de surface , la concentration de l'ion fluorures F^- y est en général, faible inférieure à 0.3 mg/l [7].

Cependant, les eaux usées provenant de certaines usines qui produisent de l'acier, de l'aluminium , des composants électroniques et des fertilisants agricoles, ainsi que les usines qui exploitent les procédés galvanoplastiques peuvent contenir des concentrations importantes d'ions fluorures . Ceci fait augmenter la teneur naturelle en fluor du cours d'eau récepteur . Cette teneur peut également croître en période de sécheresse prolongée, alors que, l'évapotranspiration est importante.

Les caractéristiques physico-chimiques de certains sols favorisent la dissolution des minéraux qui contiennent du fluor. On retrouve ainsi , dans ces sols , des concentrations d'ions fluorures pouvant atteindre 14 mg/l [7].

Chapitre Un : Généralités Sur Le Fluor

L'activité chimique et physiologique de l'ion fluorure est plus importante que celle de n'importe quel ion . Les processus enzymatiques peuvent être inhibés ou stimulés avec une faible quantité d'ion fluorure . Ainsi que les réactions entre cet ion et d'autres composés organiques ou inorganiques qui peuvent avoir lieu sont très importantes pour la physiologie humaine .

L2 EFFETS DES FLUORURES SUR LES ÊTRES VIVANTS .

L2.1 Effet sur l'homme

Jusqu'à présent les effets des fluorures sur l'homme ne sont pas encore connus parfaitement , les recherches effectuées ont montré que la consommation continue d'une eau fluorurée peut être soit bénéfique, soit nuisible.

Les ions fluorures dont la concentration varie entre 1 et 1,2 mg/l se transportent par les vaisseaux sanguins et se fixent uniquement dans les os et les dents; Le surplus étant éliminé par les reins . Au contact de l'émail des dents , les ions fluorures se combinent avec certaines substances carbonatées pour former de nouveaux composés chimiques qui résistent bien aux attaques des acides et des bactéries responsables de la carie dentaire [5].

Au contraire, une eau dont la concentration d'ions fluorures est supérieure à 1,5 mg/l favorise la fluorose dentaire (hypercalcification de l'émail des dents, du à une trop forte adsorption des ions fluorures). Ce phénomène est connu sous le nom de " Darnous " en Algérie ou " émail tacheté " .

Une concentration supérieure à 5 mg/l peut provoquer des piqures de l'émail des dents, et même entraîner la perte de ces derniers et au bout de certain nombre d'années , cette concentration provoque la fluorose osseuse caractérisée par :

- Une hypercalcification des os des tendons des articulations;

Chapitre Un : Généralités Sur Le Fluor

- La structure des os tend à s'épaissir réduisant ainsi le volume de la moelle osseuse et affectant la production des cellules rouges du sang.
- Des troubles métaboliques divers

L'âge est aussi un facteur important pour décider du point d'incorporation du fluor dans le squelette et dans les dents. Le besoin en fluor de l'émail dentaire cesse toutefois à partir de l'âge de 30 ans [12].

Les reins semblent également être un lieu d'accumulation préférentielle des fluorures .

Excrétions des fluorures:

Environ , 50% des fluorures absorbées sont éliminées par la voie urinaire . Les matières fécales et la sueur peuvent être aussi des voies d'excrétions .

Les aliments constituent également une source importante de fluor comme exemple; les dattes, le thé, les fruits et les liquides.

Les matières fécales contiennent 10 à 30 % du fluor ingéré quotidiennement la sueur quant à elle , elle peut contenir plus de 50 % en fluor ingéré dans les aliments chauds.

1.2.2 Effets sur les animaux et la végétation

Les composés fluorés transportés par l'atmosphère sous forme de poussières provoquent de grands effets sur les animaux et sur la végétation . Une dose de 0.002 ppm dans l'air crée des dommages sur la végétation [23]

Ainsi le bétail nourri avec du fourrage sur lequel les poussières fluorées se sont déposées , ou qui ont assimilé dans leurs tissus , une partie du fluorures déposés sur le sol est soumis à un danger permanent résultant de l'ingestion de ces fourrages.

Chapitre Un : Généralités Sur Le Fluor

En général , on en observe pas d'intoxication aiguë , l'animal refuse , au bout d'un certain temps la nourriture qui lui est présentée .

En revanche , l'intoxication chronique au voisinage de source importante d'émission de fluorures est largement répandue et connue sous le nom de fluorose .

D'une manière très générale et quelque soit la nature du dérivé du fluor considéré, il est observé une calcification anormale des os et des dents, caractérisée par l'apparition elle-même anormale du fluor dans la structure de ces tissus , principalement dans la partie où se trouvent des cristaux d'apatite . Il est observé , tout d'abord une diminution de la production de lait , des pertes de poids , d'apparition d'une certaine raideur des membres , l'animal se met à boiter et son pelage se durcit , cela se termine par la mort.

1.3 CONCENTRATION OPTIMALE D'IONS FLUORURES DANS LES EAUX POTABLES

La concentration optimale d'ions fluorures étant de 1 mg/l il faut en ajuster la concentration en fonction de la consommation quotidienne d'eau, laquelle varie selon la température de l'air ambiant [7].

Le tableau N°1 ci dessous présente les concentrations d'ion F⁻ en fonction de la température ambiante (normes américaines [7])

Tableau N°1 : Les concentrations d'ions fluorures en fonction température

| Intervalle de variation de la moyenne annuelle des températures maximales quotidiennes en °C | Concentration d'ions F ⁻ | | | |
|--|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| | Minimale | Optimale | Maximale | Limite . |
| 10.0 - 12.1 | 0.9 | 1.2 | 1.7 | 2.4 |
| 12.2 - 14.6 | 0.8 | 1.1 | 1.5 | 2.2 |
| 14.7 - 17.7 | 0.8 | 1.0 | 1.3 | 2.0 |
| 17.8 - 21.4 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 1.8 |
| 21.5 - 26.2 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 1.6 |
| 26.3 - 32.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 1.4 |

* Au dessus de la valeur limite , l'ion fluorure est considéré comme un contaminant.

LA FLUORURATION DES EAUX

Dans le cas ou la concentration des fluorures de l'eau de boisson est au dessous de la valeur minimale recommandé , on doit procéder à une fluoruration par ajustement chimique d'ions fluorures jusqu'à l'obtention d'une valeur optimale et pour cela les produits chimiques couramment utilisés sont

- L'hexafluorosilicate de sodium Na_2SiF_6 ;
- Le fluorure de sodium NaF ;
- L'acide hexafluosilcique H_2SiF_6 .

Il est à noter que l'hexafluorosilicate de sodium est le plus économique [7].

CHAPITRE DEUX

Les Eaux du Sud Algérien et le Problème de l'Excès en Fluor

Chapitre Deux : Les Eaux du Sud Algérien et le Problème de l'Excès en Fluor

II.1 LE FLUOROSE EN ALGÉRIE

En Algérie, les problèmes de santé liés à la surcharge de certaines eaux en sels minéraux sont dominés par la fluorose. Le cas se pose avec acuité partout dans les régions du Sud. En effet, des centaines de milliers de personnes vivent en danger permanent de la fluorose [29]; cette maladie a été signalée pour la première fois par l'Institut Pasteur d'Alger en 1936[5].

Dans le sud Algérien, la fluorose endémique d'origine alimentaire affecte une bonne partie de la population et des animaux domestiques de la région; ce qui indique l'existence de gisements de phosphates.

D'après AZOUT en 1972 [29], les analyses faites sur les phosphates provenant des gisements de Djebel Onk montrent des teneurs de 5.9 % en fluorures de Calcium.

Les recherches qui ont succédé ont pu déterminer les origines de cette maladie qui sont de trois types:

- Les eaux qui comportent des teneurs en fluor supérieures aux normes admissibles
- Affection par les poussières fluorées près des zones des gisements.
- Inhalation des fumées fluorées
- Et tout les aliments qui ont des taux des fluorures tel que les dattes, les légumes, les fruits et le thé.

Une enquête faite par SGAND [29] de l'Institut de Dermatologie Dentaire d'Alger en 1966 a montré que 76 % de la population de la ville d'El Oued sont porteurs de Dermous et 98% des villageois du Souf en sont atteints.*

Chapitre Deux : Les Eaux du Sud Algérien & le Problème de l'Excès en fluor

Une autre enquête de l'Institut National de Santé Publique (INSP) en 1980 [29] a donné les résultats suivants :

Tableau N°2 [12] :

| ville | Taux d'atteinte de la population par le fluorure |
|------------|--|
| Ourgala | 44 % |
| El Meghair | 45 % |
| Djemaa | 36 % |
| El Oued | 20 % |
| Touggourt | 18 % |
| Ghardaia | 1.3 % |
| El Goléa | 2.5 % |
| Laghouat | 3.2 % |

II.2 LES TAUX DES FLUORURES DANS LES NAPPES DU SUD ALGÉRIEN

Dans les nappes phréatiques peu profondes qui sont utilisées depuis longtemps pour la boisson et pour l'irrigation dans de nombreuses oasis du Sud, le taux du fluor est donné sur le tableau N°3

Tableau N°3 .

| ville | taux du fluor en mg/l |
|-----------|-----------------------|
| Ourgala | 1.00 à 2.20 |
| Touggourt | 2.55 à 5.90 |
| El Oued | 1.90 à 4.55 |
| Biskra | 1.75 à 2.10 |
| Ghardaia | 0.2 à 1.30 |

La nappe albiennne profonde qui semble d'étendre sur plus de 500.000Km² représente une ressource considérable d'eau et son exploitation se développe de plus en plus .

Chapitre Deux : Les Eaux du Sud Algérien & le Problème de l'Excès en fluor

Elle paraît être moins chargée comme le montre le tableau suivant (N°4)

Tableau N°4 [5]

| Ville | Taux du fluor en (mg/l) |
|----------|---------------------------|
| Ghardaia | 1.10 à 1.25 |
| Durgala | 1.00 à 2.15 |
| El Oued | 1.00 à 2.15 |
| Biskra | 1.95 à 2.20 |

2.3 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE SAHARA SEPTENTRIONAL

Les caractéristiques des eaux varient suivant les nappes et les régions, mais elles sont toutes de type sulfato-chlorurées en plus des teneurs élevées en fluorures supérieures, dans la plus part des cas, à la concentration maximale admissible, un autre problème important est celui de la minéralisation excessive.

2.3.1 Fluor

Selon l'OMS [10], les eaux de Sud Algérien présentent des taux en fluor dépassant dans la plus part des cas les normes qui se situaient entre 0.7 et 1 mg/l. Les taux les plus élevés s'observent pour la région de Tamellaht (Touggourt) : 5.28 mg/l.

Comme cité dans le paragraphe précédent seule la nappe albienne est moins chargée [5].

2.3.2 Minéralisation totale :

Ou plus des teneurs élevées en fluorures, les analyses effectuées sur les eaux du sud ont montré une surcharge par d'autres sels notamment le calcium et le magnésium.

Les eaux de la nappe albienne profonde sont toujours de minéralisation faible. [5].

Chapitre Deux : Les Eaux du Sud Algérien & le Problème de l'Excès en fluor

2.3.3 Dureté

La dureté exprime globalement la concentration en sels de calcium et de magnésium . Les valeurs du TH (titre hygrométrique) de la plus part des régions du Sud sont supérieures ou voisinantes de 10°F (degré français), donc l'eau du sud est entartante et corrosive.

2.3.4 pH & CO₂ libre

Le pH des eaux du Sud varie en moyenne entre 7 et 8 ce qui montre l'existence d'un équilibre entre les carbonates et l'acide carbonique libre.

Le dégagement de CO₂ après détente à l'air libre provoque un déséquilibre carbonique aboutissant à la précipitation du carbonate de calcium du fait que le calcium se trouve en forte teneur dans ces eaux.

2.3.5 Les températures

Les eaux des nappes phréatiques peu profondes ont des températures en générale inférieures à 30 °C par contre les températures des eaux de la nappe albienne profonde peuvent atteindre 51 °C [10].

CHAPITRE TROIS

Méthodes de défluoruration

Les méthodes de défluoruration des eaux potables sont assez nombreuses mais elles sont à la fois mal connues et peu appliquées en raison de leur coût d'exploitation élevé.[12]

Les méthodes connues jusqu'à nos jours se subdivisent en trois grands groupes

- Celles basées sur la précipitation coagulation
- Celles basées sur l'adsorption ou l'échange d'ions
- Et celles basées sur des principes électrochimiques telles que l'électrolyse , les techniques à membrane

Dans ce présent travail , on essayera d'utiliser un procédé plus récent qui est l'électroadsorption qui est une méthode basée sur la combinaison de deux dernières classes.

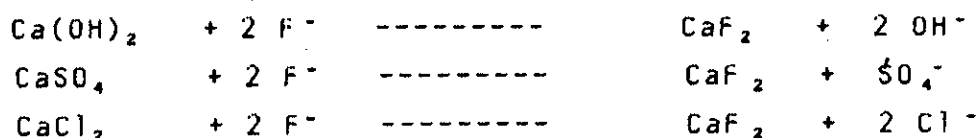
Bien que les techniques de défluoruration viennent de faire l'objet d'un certain nombre travaux et de publications par le monde , il est , à l'heure actuelle très difficile, d'estimer précisément le montant d'une installation et d'établir un bilan d'exploitation .

En effet les quelques réalisations industrielles montées se trouvent aux USA et les expérimentations effectuées ont été menées principalement sur des eaux artificiellement chargées en fluorures.

III.1 ELIMINATION PAR PRÉCIPITATION

III.1.1 Utilisation des sels de calcium

Les sels de calcium comme Ca(OH)_2 ; CaCl_2 , et CaSO_4 sont les plus utilisés pour précipiter les ions fluorées sous forme de CaF_2 (Fluorine) selon les réactions suivantes



Toutefois d'après BENIFIELD [7], la méthode de précipitation par le calcium ne permet pas d'obtenir une concentration acceptable d'ions fluorures (1 mg/l) lorsque la dureté est inférieure à 200 mg/l. Mais néanmoins elle peut être employée à condition que l'eau présente une teneur suffisante en magnésium qui adsorbe le fluor, dans le cas contraire, il faut enrichir fortement l'eau de magnésium ou par l'utilisation de chaux dolométrique. On estime qu'il faut environ 50 mg/l de magnésium pour éliminer 1 mg/l de fluor [8].

Ultérieurement, SCOTT et All [] ont précisé que la réduction des fluorures était fonction de la quantité de magnésium précipitée durant l'adoucissement et suivant la formule empirique suivante :

$$F = F_0 (1 - 0.07 \sqrt{Mg})$$

F_0 : Concentration initiale d'ions fluorures

F : Concentration d'ions fluorures

III.1.2 Utilisation des sels d'Aluminium :

L'emploi des sels d'Aluminium comme agent défluorurant aboutit à de bons résultats selon les expériences faites sur les

eaux souterraines au Sénégal [27]. Des essais réalisés sur des échantillons de 200 ml d'eau de la région de Fatick ont donné les résultats suivants :

- Le sulfate d'aluminium permet d'atteindre 0.9 mg/l de fluor résiduel , de même pour le nitrate d'Aluminium .
- Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'Acétate d'aluminium (fluor résiduel 0.8 mg/l)
- Et le Chlorure d'aluminium donne une concentration résiduelle de 0.6 mg/l de fluor.

Parmi les réactifs testés , seuls les sels d'aluminium présentent un intérêt pratique . Le sulfate d'Aluminium , bien qu'il ne soit pas le plus performant , nous paraît le mieux adapté en raison de son prix et son usage courant dans les processus de traitement des eaux [27].

Ce procédé ne semble envisageable que pour des eaux fortement magnésiennes et faiblement chargées en fluorures . Une installation industrielle basée sur ce principe a été construite à Bloomdake (Ohio , USA) où la teneur en fluorures est réduite de 2.2 à 1.2 mg/l sans addition complémentaire de magnésium [27].

III.2 ELIMINATION PAR ADSORPTION ET ÉCHANGE D'IONS :

Les adsorbants et les échangeurs d'ions servent à traiter les eaux faiblement chargées en fluor

III.2.1 Utilisation du phosphate tricalciques

Il a été remarqué depuis longtemps l'affinité du fluor pour ce corps puisqu'on trouve toujours des teneurs notables en fluor dans les phosphates naturels tels que les apatites , les phosphorites (2. à 5 %) , de même que dans les os . On a envisagé l'utilisation :

- Soit de produits naturels tirés des os de bétails en particulier cendre d'os noir animal) ou poudre d'os

- Soit de l'apatite synthétique, que l'on peut fabriquer au sein de l'eau par un mélange soigneusement contrôlé de chaux et d'acide phosphorique [8].

La méthode de régénération se fait le plus souvent par la soude caustique et l'acide chlorhydrique ou phosphorique [7].

III.2.2. Utilisation de l'Alun

La réaction de l'alun avec l'alcalinité produit un précipité d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$, il semble que les ions fluorures soient adsorbés sur ce précipité ; c'est du moins ce qu'a été observé à l'usine de traitement de Cross (Kansas) lorsqu'on traite une eau douce très minéralisée qui contenait 3,6 mg/l d'ions fluorés. Pour réduire la concentration d'ions fluorés à 1 mg/l ; On a ajouté une concentration de 315 mg/l d'Alun [7].

III.2.3 Le charbon actif

D'après MAZOUNIE [16], ce type de traitement avec régénération à la soude et le gaz carbonique ne peut s'appliquer qu'à condition de travailler en milieu très acide $pH = 3$ et de pratiquer ensuite une recarbonation ; ce qui le rend inapplicable dans la plupart des cas. [12].

III.2.4 La Bauxite activée

La Bauxite est constituée essentiellement par un mélange de deux composées $AlO-OH$ et $FeO-OH$, le procédé de défluoruration par la bauxite est semblable à celui utilisant l'alumine activée, mais à une efficacité moindre ; Cependant, il est beaucoup plus efficace que le charbon actif. La réduction des fluorures est importante lorsque le pH de l'eau à traiter est situé entre 5,5 et 7 mg/l [12].

III.2.5 Alumine activée

L'adsorption à l'alumine activée est le procédé le plus utilisé à l'échelle pilote car il est le plus économique . Ce procédé constitue une partie de notre travail .

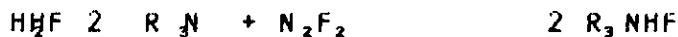
III.2.6 Utilisation des résines synthétiques

Benson et Al [7] ont utilisé des résines anioniques et cationiques pour la défluoruration de l'eau . Ils ont expérimenté un procédé en deux étapes

- Au cours de la première étape , une résine cationique élimine les ions sodium*



- Pendant la seconde étape , une résine anionique élimine le



Ce procédé a permis de réduire la concentration de 10 à moins de 1 mg/l lorsqu'il a utilisé de coups les échangeurs.

III.3 DÉFLUORURATION PAR ÉLECTROLYSE

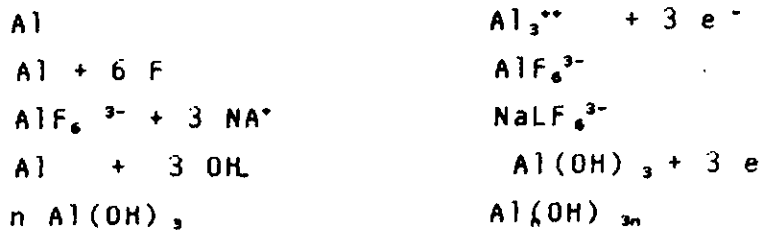
Au cours des années 80 , le domaine de traitement des eaux a connu l'introduction de nouvelles techniques de traitement en utilisant l'énergie électrique comme source de séparation

La réduction de la teneur en fluorure par électrolyse en utilisant les électrodes en aluminium a été mise point pour la première fois par LIN MING et Al [10] .

Le principe de cette méthode est basé sur la précipitation des fluorures sous forme de complexes AlF_6 , Na_3

D'après ces auteurs , lorsqu'une anode pure en aluminium

Les réactions chimiques suivantes auront lieu



Actuellement les travaux de recherche s'orientent vers l'utilisation d'un système d'électrolyse en continue sous forme d'électrodécanteur lamellaire à électrode bipolaire [] pour permettre une séparation simultanée de bornes formées en cours de l'électrolyse d'une part et se rapprocher du cas d'une application d'une autre part.

IL4 DÉFLUORURATION PAR OSMOSE INVERSE:

L'osmose inverse est une opération en un transfert de solvant à travers une membrane semi-perméable, sous l'action d'une pression extérieure supérieure à la pression osmotique de la solution à concentrer

Les membranes osmotiques sont perméables à l'eau pure mais constituent des barrières infranchissables pour les corps dissous à l'état moléculaire ou les particules colloïdales. C'est pour cela qu'on peut utiliser l'osmose inverse comme méthode spécifique pour la minéralisation totale de l'eau ce qui est appliqué dans les stations de production d'électricité pour refroidir à partir de l'eau de mer.

Pour éviter le colmatage des membranes osmotiques, il faut envisager des traitements préliminaires visant à éliminer les ions Ca^{2++} , et SO_4^{--} susceptibles de former des précipités sur les membranes de l'osmoseur [29].

III.5 DÉFLUORURATION PAR ÉLECTRODIALYSE

L'électrodialyse est un procédé de dessalement qui consiste à éliminer des sels dissous dans les eaux salines ou saumâtres par migration à travers des membranes sélectives aux anions et aux cations sous l'action d'un champ électrique.

Les membranes intercalées entre les électrodes sont imperméables à l'eau et perméables respectivement aux anions et aux cations suivant les résultats de l'étude entreprise par MAZIGHI [29].

L'électrodialyse permet d'aboutir dans les meilleures conditions à un bon pourcentage d'élimination du fluor

Cependant ce procédé a un inconvénient majeur, celui de l'électro-osmose, de sorte qu'un transfert d'eau s'effectue à travers les membranes à cause des forces visqueuses ou électrostatique dues aux ions.

CHAPITRE QUATRE

Défluoruration Par Adsorption Sur Alumine Activée

VI 1 DEFINITION DE L'ADSORPTION:

Quand un corps solide est plongé dans un liquide contenant des corps dissous, on constate dans certaines circonstances que la composition chimique du liquide varie au voisinage de la surface du solide; tout se passe comme il y avait une fixation de certains corps dissous sur le solide, ce phénomène est connu sous le nom de l'adsorption.

Cette adhérence de corps adsorbé sur la surface solide doit être relié aux champs de forces moléculaires se créant à la surface du solide.

VI 2 NOTIONS SUR L'ADSORPTION SUR COLONNE.

Parmi les différents procédés de traitement, l'adsorption sur colonne s'avère comme étant le procédé le plus efficace et aussi le plus économique à cause de son double rôle qui se résume dans l'adsorption des particules qui présentent une affinité à cet adsorbant et comme étant un support de filtration qui empêchent dans ce cas le passage des matières organiques et de nombreux composés résistent aux procédés conventionnels de traitement.

Le dimensionnement de ces unités est basé sur des considérations hydrodynamiques et physico-chimiques (vitesse superficielle du fluide; temps de séjour, concentration, affinité adsorbant-adsorbant; granulométrie, ect...).

La vitesse d'adsorption est gouvernée par:

- La diffusion des molécules vers la surface de l'adsorbant au travers du film liquide.
- La diffusion des molécules au sein des micro-pores de l'adsorbant et l'adsorption sur les sites internes (fig n°1).

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

Dans la plupart des cas, la vitesse d'adsorption est d'autant plus grande que la granulométrie de l'adsorbant optimale;

- La concentration du soluté adsorbable est élevée ;
- La surface spécifique de l'adsorbant est élevée;
- La taille des molécules adsorbables est faible [28].



1) Molécule du solvant

2) Molécule du substance dissoute

3) Zone accessible aux molécules de solvant

Figure N°1: Diffusion des molécules au sein des micropores de l'adsorbat

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

VI-2-1 Méthodes de calcul

Les méthodes de calcul les plus utilisés actuellement sont regroupées en deux classes différentes:

A Méthode mathématique

Cette méthode tient compte de tous les phénomènes intervenant dans le processus d'adsorption.

Donc c'est une description mathématique spacieuse et temporelle de la distribution l'adsorbant entre les deux phases.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle permet une description complète du mécanisme d'absorption; et les relations mathématiques, une fois établies, l'influence des divers paramètres peut être prédite.

Mais malheureusement, la résolution des équations globales nécessite toujours des considérations simplificatrices, ce qui fait que les solutions trouvées sont des cas particuliers[11].

B Méthode de la zone de transfert de matière

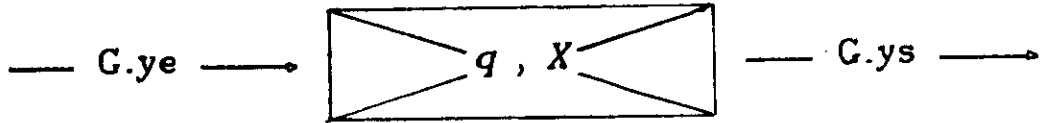
Ce concept a été élaboré par MIKAELE, de l'union CARBIDE, pour des lits de résines échangeuses d'ions puis adapté par LUKCHIS aux lits d'adsorbant.[11]

C'est une méthode simple et efficace qui permet de trouver rapidement des corrélations pour les systèmes d'adsorption dynamique.

Avant de développer ce modèle les hypothèses suivantes doivent être vérifiées .

- Un lit uniforme
- Un débit volumique et une concentration uniforme pour la phase liquide.
- Pas de changement de phase .
- Une énergie d'adsorption négligeable. (?)
- Pas d'interaction entre molécule adsorbées.

Schema de fonctionnement du lit



Analyse du lit
(Charge en fct de la long)

Analyse de l'effluent
(Concentration fct du temps)

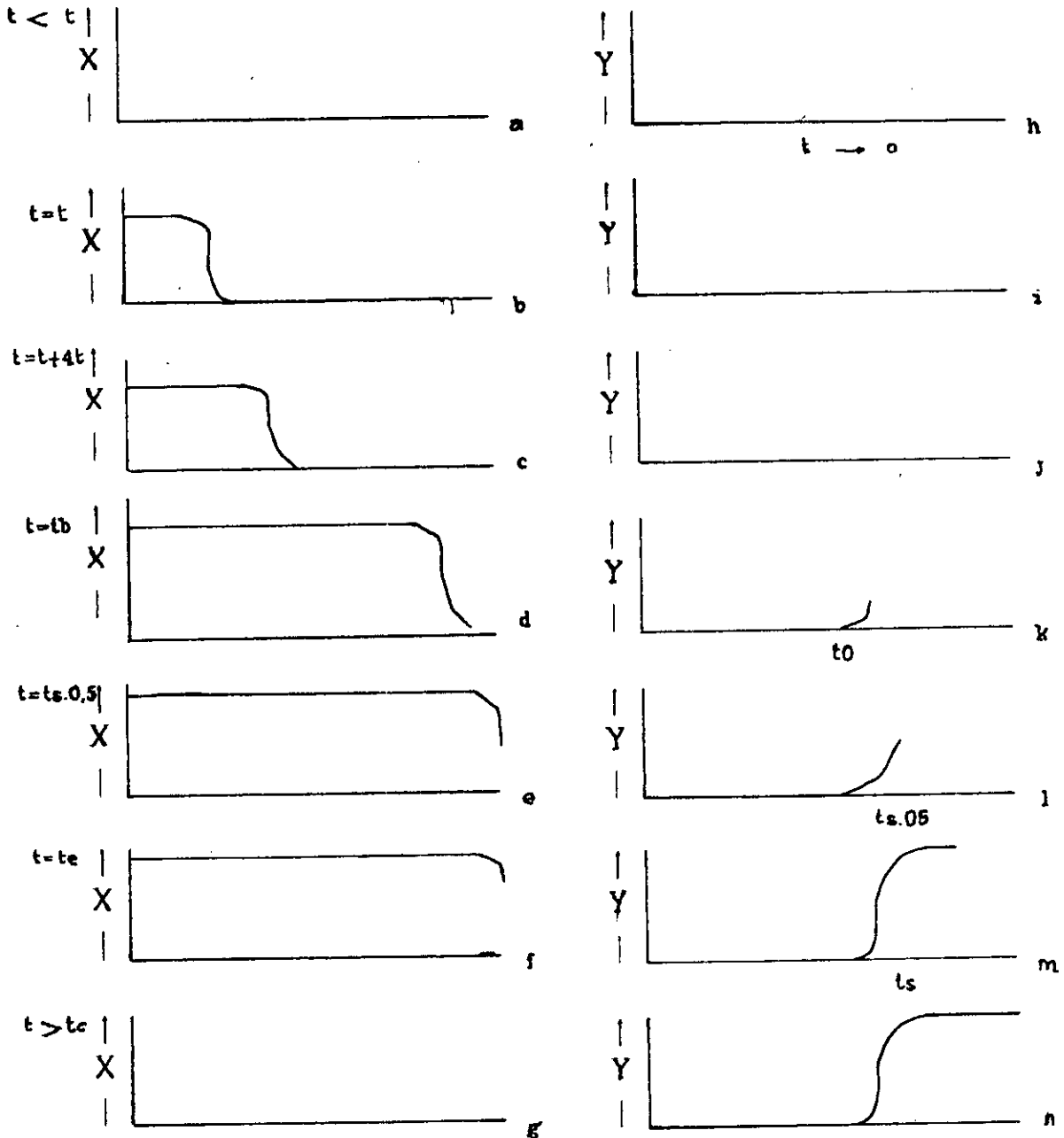
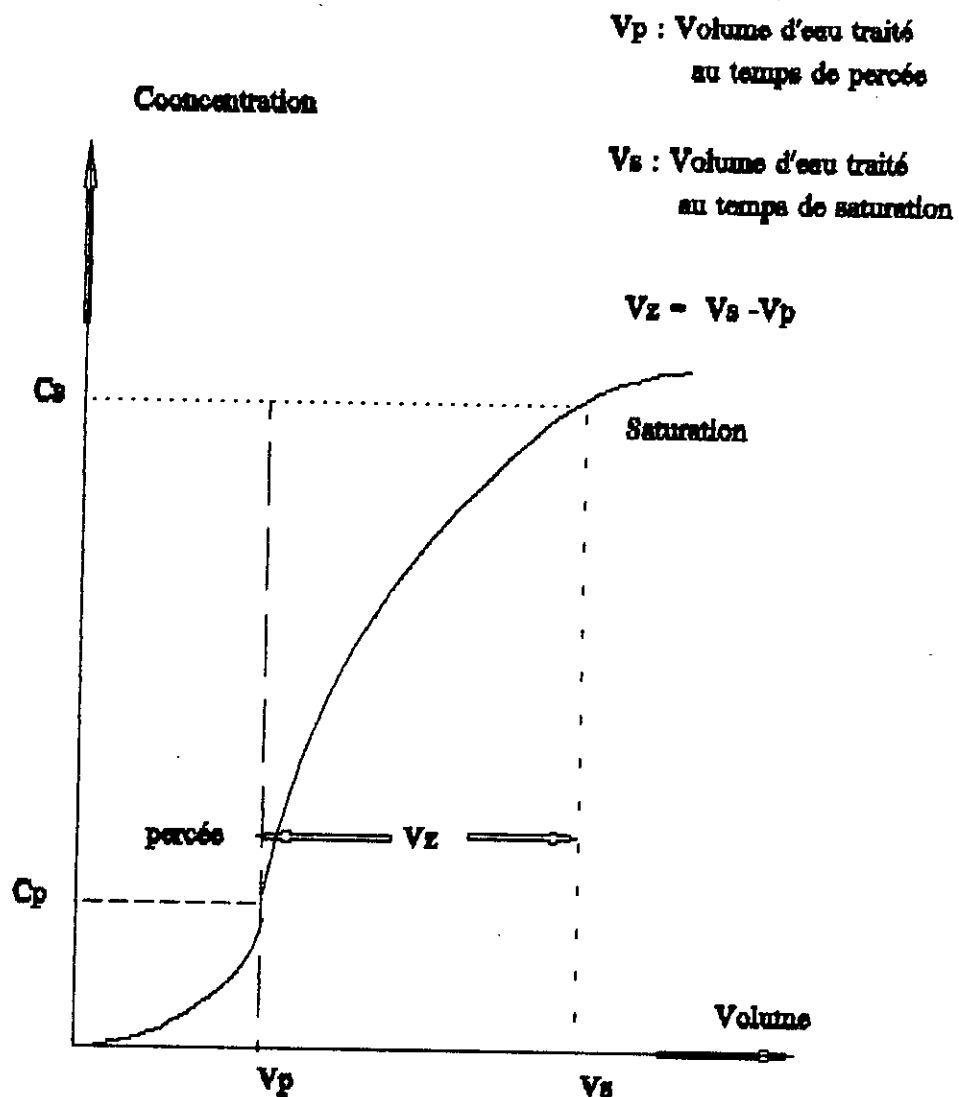


Fig n° 2

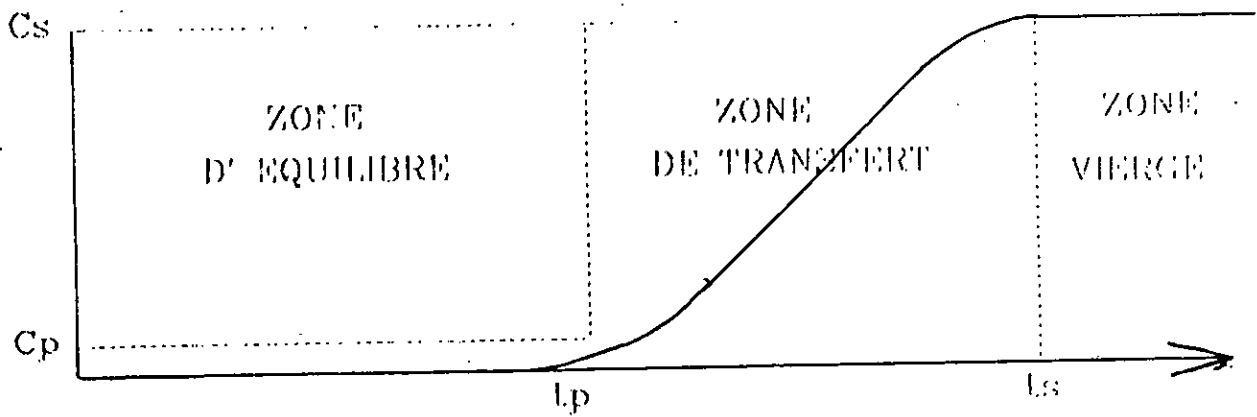
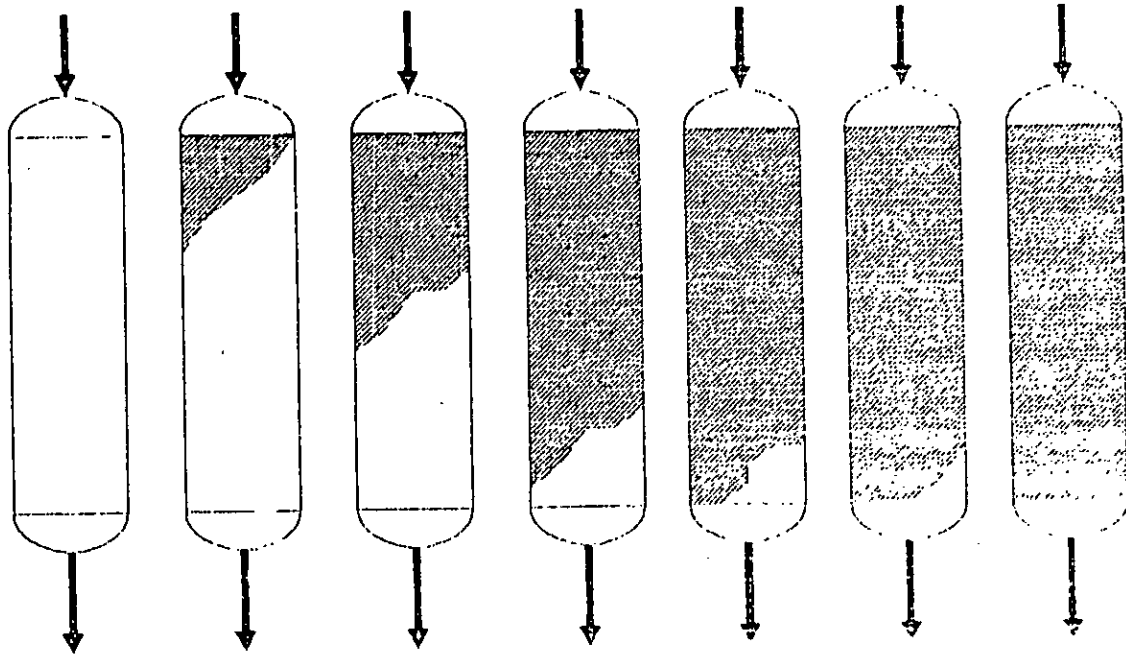


C_p : Concentration de percée
 C_s : concentration de saturation

Figure N3: Evolution de la concentration de l'effluent en fonction du volume recueilli

Progression du Front de la Z.T.M
à travers un lit d'absorbant.

Fig n° - 4 -



C_p : Concentration de percée = 1 mg/l

C_s : Concentration desaturation = 8 mg/l

T_p : Temps de percée

T_s : Temps de saturation

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

Le principe de fonctionnement d'un lit est schématisé par les figures (2,3,4). et nous montrent comment varie la concentration du soluté en fonction du temps et de l'espace.

Les différentes étapes sont

- a- Debut de l'opération
- b- Formation de la Z-I-M c'est la zone où s'effectue le phénomène de transfert entre les deux phases
- c- Déplacement de la Z-I-M et à cette étape le lit se décompose en trois parties
 - Zone du lit en équilibre avec la phase mobile
 - Zone de transfert de matières où se déroule le processus
 - Zone non encore utilisée
- d- La Z-I-M à atteint le bas de la colonne et l'analyse de l'effluent indique une concentration notable .
On est au point de percée.
- e- C'est la demi saturation du lit
- f-g on est au point de saturation, la concentration du l'influent et égale à celle de l'effluent

B-1-La capacité fractionnaire d'un lit:

La capacité fractionnaire d'un lit mesure l'efficacité d'élimination de l'adsorbant.Elle indique quelle est la fraction de solide qui participe au phénomène d'adsorption.

On le définit comme étant la quantité d'adsorbant effectivement éliminée par rapport à la capacité potentielle d'élimination de l'adsorbant à l'interieur de la zone de transfert de matière.

Le calcul mathématique de la capacité fractionnaire:

D'après la fig-3 la quantité de produit éliminée par la Z.I.M entre les points de percée et de saturation est déterminée graphiquement.

$$Q_e = \int_{V_p}^{V_s} (C_0 - C) d_v \quad (1)$$

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

- Q_i : Quantité de produit éliminée par la Z-I-M
 V_s : Volume de l'effluent collecté au point de saturation.
 V_p : Volume de l'effluent collecté du point de percée.
 C_0 : Concentration de l'influent.
 C : Concentration instantannée de l'effluent.

Dans le cas idéal, c'est à dire le cas où il n'y a pas de résistance au phénomène d'adsorption, la concentration passe instantanément de C à C_0 , et la quantité de produit éliminée est maximale et est égale à.

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= C_0 V_z \\ Q_{\max} &= C_0 (V_s - V_p) \quad (2) \end{aligned}$$

Par conséquent, la fraction d'adsorption, à l'intérieur de la Z-I-M qui participe effectivement au phénomène de transfert est:

$$F = \frac{Q_z}{Q_{\max}} = \frac{\int_{V_p}^{V_s} (C_0 - C) dV}{C_0 (V_s - V_p)} \quad (3)$$

B-2 Hauteur de la zone de transfert de matière:

Elle mesure la vitesse d'élimination du soluté par le lit c'est la zone du lit où s'effectue l'adsorption et où la concentration de l'effluent passe de la concentration de percée (C_p) à celle de saturation (C_s).

Il est clair que le choix de C_p et C_s est arbitraire cependant C_p est habituellement prise comme concentration minimale détectable ou maximale admissible.

La hauteur de la Z-T-M notée H_z peut être déterminée par la relation :

$$H_z = U_z \cdot t_z \quad (4)$$

U_z - Vitesse de déplacement de la Z-T-M.

t_z - Temps requis par la Z.T.M pour se déplacer de sa propre profondeur et il est proportionnel au volume V_z .

$$t_s = \frac{V_z}{U_l \cdot A} \quad (5)$$

U_l , vitesse linéaire de l'effluent.

A : aire de la section droite.

A part sa période de formation, la Z.T.M. se déplace le long de la colonne avec une vitesse constante U_z égale à :

$$U_z = \frac{H_z}{t_s - t_p} \quad (6)$$

La seule inconnue dans l'équation (6) est le temps de formation de la Z.T.M, cependant, il peut être estimé de la manière suivante:

- Si la capacité fractionnaire est nulle $F=0$, cela veut dire que l'adsorbant est entièrement saturé et le temps de formation de la Z.T.M est pratiquement égale au temps que met cette dernière à parcourir sa propre profondeur, donc $t_f = t_z$.

- Si la capacité fractionnaire est égale à l'unité $F=1$, cela veut dire que l'adsorbant est exempt d'adsorbat et le temps le

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

formation de la Z.T.M est extrêmement court et à la limite peut être considéré comme nul: $t_1 \approx 0$.

On en déduit une relation simple qui vérifie ces deux conditions et qui permet d'estimer ce temps, à savoir

$$t_1 = (1 - F) \cdot t_2$$

En combinant les équations (4), (5) et (6) nous obtenons:

$$H_z = \frac{t_2}{t_s - (1 - F) t_2} = H_t \frac{V_z}{V_s - (1 - F) V_z} \quad (7)$$

Comme $V_z = V_s - V_p$, on obtient finalement :

$$H_z = H_t \frac{V_s - V_p}{V_s (1 - F) (V_s - V_p)} = H_t \frac{V_s - V_p}{V_p + F(V_s - V_p)} \quad (8)$$

B-3 Vitesse de déplacement de la Z-T-M.

Elle mesure la vitesse de saturation du lit et elle est donnée par la relation:

$$H_z = U_z \cdot t_2 \rightarrow U_z = \frac{H_z}{t_2}$$

Connaissant H_z , on en déduit :

$$U_z = \frac{H_t}{t_s - (1 - F) t_2} \quad (9)$$

et comme $t_2 = t_s - t_p$, alors:

$$U_z = \frac{H_t}{t_p + F(t_s - t_p)} \quad (10)$$

IV.3 DESCRIPTION DE L'ALUMINE ACTIVÉE

L'alumine activée est un matériau léger, poreux, contenant une surface spécifique condensée en grande partie de sites actifs.

Elle est obtenue par calcination à une température inférieure à 500 °C de l'aluminure hydratée $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ elle-même obtenue par attaque alcaline de la bauxite [12].

Il existe différents types d'alumine activée en fonction notamment de la température de calcination.

La composition de cette alumine est en générale la suivante:

- Alumine de transition $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ($n < 0,5$) 75 à 95 % qui est le constituant actif.
- Bohémite $Al_2O_3 \cdot H_2O$ 25 à 5%, le constituant inactif.

Les impuretés ne sont présentes qu'à l'état de traces, sous forme d'oxyde de Fe, Ti, Na et silice [2].

La densité réelle est de 3,0 et la densité apparente est de 0,77 environ. Les diamètres des pores sont compris entre 20 et 60 Å, la surface BET est de l'ordre de 250 m²/gr et le volume des pores est de 30 à 35 cm³/100g. [2].

Les alumines utilisées en traitement des eaux pour l'élimination des composés, tant minéraux qu'organiques sont les alumines à basse température de formule $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ($n < 0,6$) en raison de leur plus grande surface spécifique et de leur meilleur pouvoir adsorbant.

IV.4 ETUDE DE LA RÉGÉNÉRATION

La régénération permet la réutilisation du lit adsorbant après saturation , il existe trois modes de régénérations au sulfate d'alumine , à la soude et l'alumine de soude .

IV.4.1 Régénération au sulfate d'alumine

La procédure entreprise par MAZOUNI [16], rejoint celle de SAVENELLI et BLACK [3] à savoir

- Passage à co-courant d'une solution de sulfate d'alumine à 5 % et un débit volumique de 15 V/V/h ce qui adonné 23 g/l de sulfate d'alumine consommée par gramme de fluor fixé.
- Rinçage à l'eau brute à co=courant à un débit volumique de 15V/V/h

IV.4.2 Régénération à la soude

Un rapport technique de l'EPA 1978 [12] propose une régénération à la soude celle ci peut être accomplie dans les conditions suivantes

- Extraction des fluorureses par un volume de NaOH 1 % (en masse) égale au volume de la colonne.
- Rinçage à l'acide sulfurique 0.05 N avec un volume égale à 1.8 fois l volumè de la colonne.
- Rinçage final à contre courant avec de l'eau.

D'après les résultats de MAZOUNIE [16] , les condistions de régénration ainsi définies conduisent à des consommations de soude et d'acide sulfurique respectives de 8.3 et 10 G/G de fluor fixé

Chapitre Quatre : Défluoruration Par Adsorption sur Alumine Activée

IV.4.3 Régénération à l'aluminate de soude

Les essais de MAZOUNIE [16] ont montré la possibilité d'une régénération de l'alumine activée par l'aluminate de soude, qui peut être effectuée dans les conditions suivantes :

Passage à contre courant d'une solution d'aluminate de soude à 2% sur la base d'une consommation de 45 g de NaAlO_2 pur par gramme de fluor fixé

- Rinçage à l'eau brute à contre courant.

IV.4.4 Effet du champ électrique sur la régénération

Dans ce travail on va essayer de voir l'effet du champ électrique sur la régénération et cela par changement de polarité car on suppose que ce fait change la direction du champ et par conséquent la direction de mobilité des ions F^- .

CHAPITRE CINQ

Traitement Electrochimique Des Eaux

V.1. INTRODUCTION:

Le développement de l'électricité comme nouvelle source d'énergie, l'aspect non polluant et les facilités d'automatisation qu'elles apportent, devaient permettre un développement dans les prochaines années.

Un certain nombre de techniques utilisant plus au moins directement l'énergie électrique se sont déjà développées, d'autres sont en cours d'étude et donnent de bons résultats en laboratoire.

L'électricité en tant que source d'énergie ou mode directe de traitement se prête bien à des associations avec d'autres techniques nouvelles, en particulier les techniques de membranes et échange d'ions, c'est le cas de notre travail où on veut voir l'intérêt de ce couplages.

V.2. LES EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE**V.2.1 Electrolyse****V.2.1.1 Electrolyse directe**

Cette technique est devenue classique. Elle nous permet d'oxyder ou de réduire des petites molécules organiques ou minérales ainsi que certains ions.

Les surtensions aux électrodes et la cinétique électrochimique jouent alors un rôle très important, il faut alors utiliser des électrodes à forte surtension, ce qui n'est pas économique à l'échelle industrielle.

Mais l'avantage de ce procédé c'est qu'il peut oxyder les molécules non oxydables comme l'EDIA ou le chrome , on a pu de même observer un effet électrochimique directe sur les virus []

V.2.1.2 Electrolyse indirecte

Dans le cas où l'électrolyse directe est inefficace, ce qui est le cas pour les bactéries [17] ou lentes, il est nécessaire de générer électrochimiquement un oxydant dont l'action pourra se prolonger même après la sortie de l'électrolyseur. Pour cela il est possible d'oxyder des halogénures Cl^- Br^- I^- et c'est ici le système utilisant du brome qui donne les meilleurs rendements grâce à une meilleure cinétique électrochimique et chimique.

L'inconvénient de ce système est qu'il nécessite la présence ou l'ajout d'halogénures, sauf dans le cas où on peut trouver des électrodes capables de générer de l'eau oxygénée par oxydation de l'eau en oxygène suivi d'une réduction de cet oxygène en peroxyde. sans que ces électrodes peuvent provoquer un autre phénomène indésirable.

V.2.2 Champs électrique:

Le champ électrique peut avoir un effet électrocinétique en influant sur l'équilibre statique d'un solide chargé avec une solution; c'est le cas de l'électroosmose ou d'électrophorèse bien connue.

Le champ électrique peut avoir d'autres effets:

- effet bactéricide;
- modification de la structure des précipités.
- éviter les dépôts ou incrustations de matières insolubilisées sur les parois des réservoirs ou canalisations [17]

V.3 ELECTROCOAGULATION-FLOCCULATION

L'action du champ électrique a pour effet de mettre en mouvement les particules colloïdales chargées. Contrairement à ce qui se passe par agitation mécanique, ce sont ici les plus petites et les plus chargées qui sont mises en mouvement.

L'action du champ électrique est en général couplée avec une électrolyse et il faut distinguer ici les procédés à anodes solubles (l'électrodecantation) et les procédés à anodes insolubles (électroflotation).

V.4. Electrodetoxication:

Sous ce terme général on peut classer toutes les méthodes électrochimique de traitement de solutions de produits toxiques: nous citerons particulièrement l'oxydations des cyanures, la réduction des chromates, et la destruction de certains insecticides (malathion, acide diméthyl-dithiophosphorique) qui peuvent être oxydés sur des électrodes de titanes platiné, pour donner un huile insoluble que l'on extrait facilement.

Il est également possible de réduire certains métaux lourds.

V.5. Electrochloration

Ce procédé consiste à former un agent bactéricide par électrolyse d'halogénure et plus spécialement de chlorure cette technique s'applique bien sûr, tout particulièrement à l'eau de mer.

V.6. Electrodecontation

Nous appellons ainsi tous les traitements électriques permettant de réduire les contamination organiques ou biologiques d'une eau: diminutions de la DCO ou du nombre de microorganique [17].

V.7. Electroadsorption

Il a été prouvé que les électrodes de charbon actif peuvent par chimisorption catalyser un certain nombre de réactions qui peuvent être mises à profit pour oxyder divers polluants [17]

Dans nôtre travail, on essaye de voir l'effet du champ électrique sur l'adsorption sur alumine activée en utilisant des électrodes d'inox. les résultats sont exprimés dans la partie expérimentale.

CHAPITRE SIX

Généralités Sur La Modélisation

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

La mise en modèle des processus ou modélisation est une opération fondamentale , aussi bien en Génie des Procédés qu'en d'autres filières Géologie , Aéronautique , Génie Civil, Prospection de Pétrole etc... .

Elle répond à plusieurs objectifs dont l'importance relative dépend du phénomène étudié .

Le modèle étudié se prête particulièrement bien à diverses utilisations. Une fois établi , il est possible de se rendre compte du comportement du système à la suite d'une modélisation d'un ou plusieurs paramètres . Le modèle permet alors de faire des prévisions , de formuler des recommandations, il ouvre donc la voie aux problèmes de l'optimisation .

Les avantages substantiels et divers des différents types des processus constitue une des préoccupations importantes de l'ingénieur.

La première question qui se pose est celle du choix du modèle adéquat.

VI.2 LES MODELES

Un modèle est la représentation plus ou moins approchée d'un processus. Lorsque l'ensemble du processus soumis à un examen est décrit de manière simplifiée au moyen d'un ensemble d'équation mathématique , on dit que l'on a affaire à un modèle mathématique .

VI.2.1 Différents types de modèles

Il existe trois types de modèles

Les modèles homologues

Les modèles analogiques

Les modèles mathématiques

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

VI.2.1.1 Les modèles homologues

Dans ce type de modèle , il n'y pas de transposition des variables , à titre d'exemple en hydrodynamiques , le débit du gaz ou liquide dans le processus est représenté par un débit ou de liquide dans le modèle correspondant .

VI.2.1.2 Les modèles analogiques

Dans ce type de modèles , il y a transposition des variables on pourra ainsi construire des modèles électriques , électromécaniques pneumatiques , mécaniques

L'analogie la plus familière est hydraulique-électrique. Une hauteur de chute d'eau peut être représentée par une différence de potentiel et réciproquement.

VI.2.1.3 Les modèles mathématiques

Le modèle mathématique est celui lequel tendent tous les autres, il doit avoir la forme la plus générale , la plus facilement utilisable.

Un modèle mathématique est donc composé d'un ensemble d'équation mathématiques qui prises individuellement sont simples . Néanmoins , la variété des interactions entre les variables communes aux diverses équation rend l'ensemble généralement complexes.

III.2.2 Procédure pour une approche analytique du modèle

La procédure pour conduire à une étude analytique peut être regroupé en 7 étapes comme suit Le premier pas , peut être l'un des plus importants , c'est la définition du problème lui-même , à ce niveau il n'est pas impossible d'établir une règle suffisamment générale pour définir la problématique.

La seconde étape c'est la définition de la théorie qui gouverne le phénomène , cette théorie est souvent disponible à partir des sources différentes publiées ou non publiées mais pour les cas isolés dans lesquels il n y a point de théorie publiée , il en vaut la peine de postuler une ou

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

plusieurs , et de tester sa validité après avoir comparé la solution du modèle mathématique avec celle des résultats expérimentaux

Après la théorie c'est la mise en équations puis leur résolutions . On place chaque équation dans le bloc de circulation de l'information afin de monter combien d'équations sont susceptibles d'être utilisées

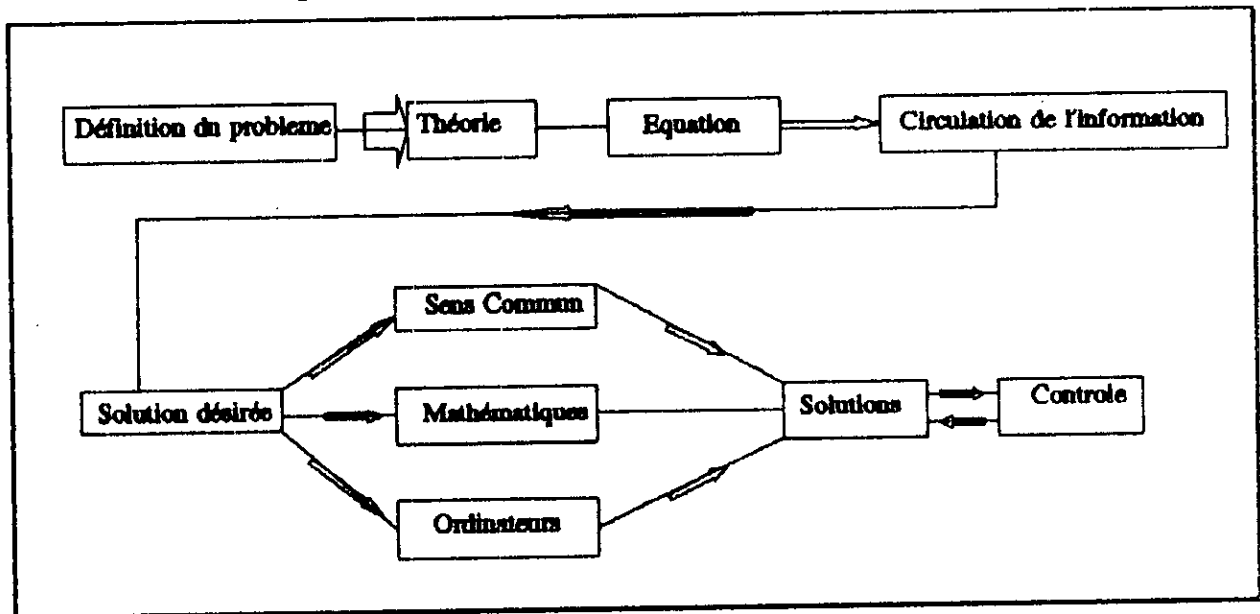


Figure N°5: Schématisation des étapes de la modélisation

La considération de la solution demandée est une étape préliminaire et nécessaires pour la phase de compilation

la phase de compilation qui s'en suit offre plusieurs directives à la solution . La sélection de la méthode dépend de la complexité des équations à résoudre

Il y a trois niveaux généraux , le plus élémentaire est : " le sens commun " la solution désirée peut être obtenue à partir du modèle par vérification , si les équations ou les solutions demandées sont suffisamment simples , il est clair que cette technique ne peut être extrapolée pour les cas les plus complexes.

Le second niveau , encore réduit aux systèmes des modèles complexes résout les équations par la méthode analytique

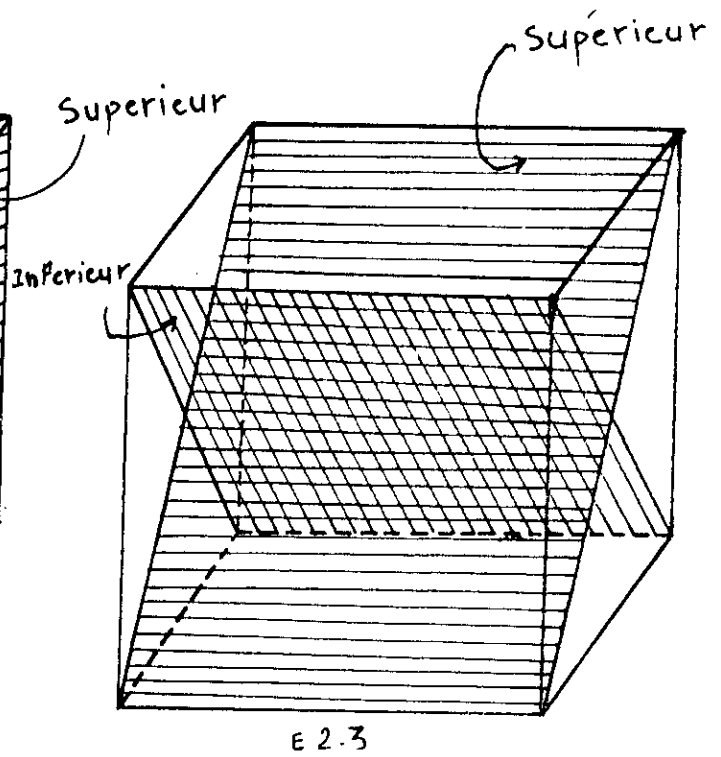
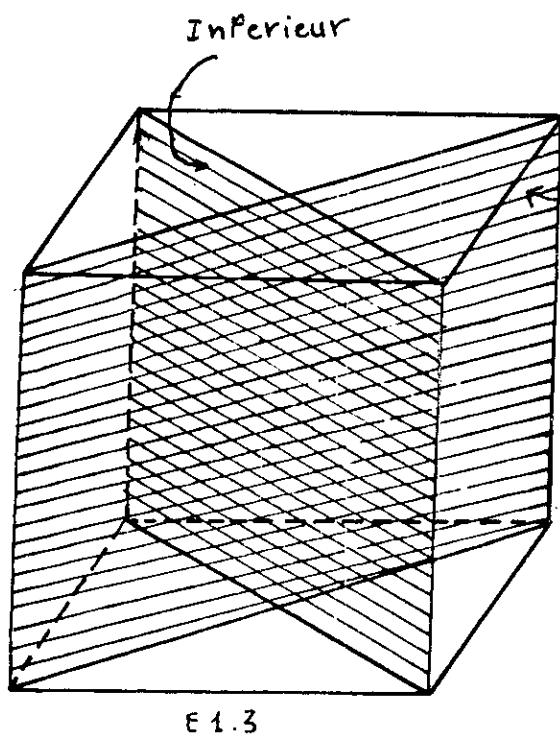
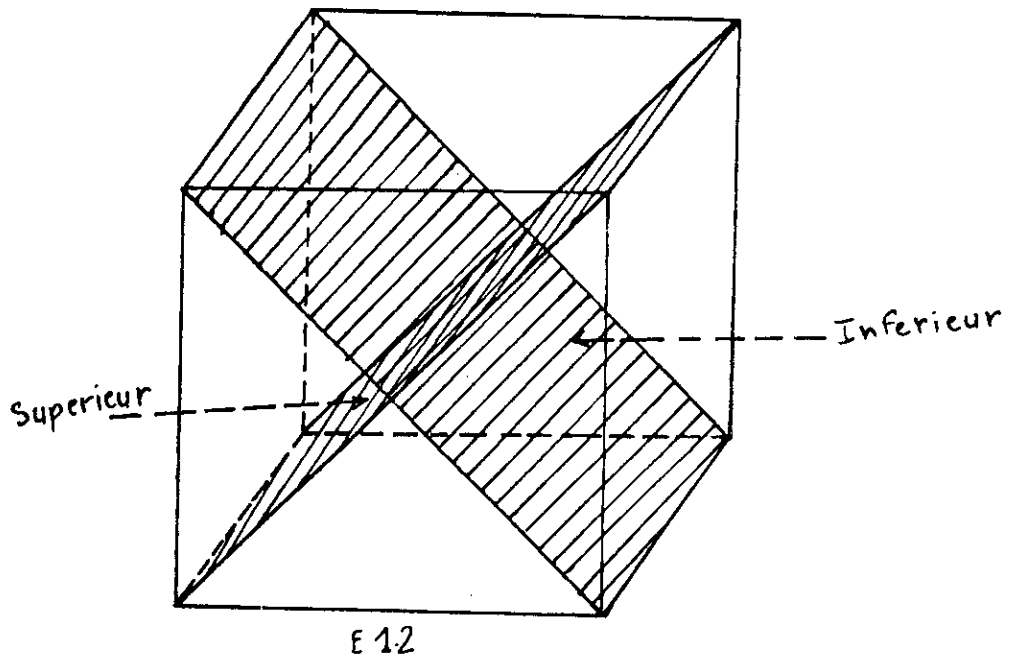


Fig: N° 6 : Interaction de deux facteurs

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

La dernière phase est l'étude et la vérification de la solution obtenue à partir du modèle mathématique

VL3 FORMULATION DES MODÈLES MATHÉMATIQUES

L'établissement d'un modèle aussi simple soit-il requiert des résultats expérimentaux, et le problème est de connaître le nombre, la précision et la localisation des résultats nécessaires à l'établissement du modèle

Il existe deux situations extrêmes soit qu'on dispose d'un certain nombre de résultats expérimentaux soit un terrain vierge ou l'on imagine l'expérimentation c'est les plans d'expériences " Experimental Design "

IV.3.1 Les plans d'expériences [1]

Lorsqu'on ne dispose pas de résultats expérimentaux en quantité suffisants ou lorsqu'on leur qualité médiocre ne permet pas l'élaboration d'un modèle, il serait donc important de définir le programme d'expérimentation ; Un plan d'expériences est constitué par une série d'essais effectués selon un programme systématique

L'objectif final est de permettre l'élaboration d'un modèle mathématique moyennant le minimum d'essais. Le programme expérimental le plus logique et le plus souhaité pour n'importe quel système physique ou situation, est le plan factoriel.

Les conditions expérimentaux sont choisies par la sélection de niveau pour chaque variable.

VL3.1.1 Plan factoriel 2^n

Le plan factoriel d'expériences dont l'application est la plus générale pour les modèles formels est le plan factoriel à deux niveaux, dit plan factoriel 2^2

Un tel plan nécessite 2^n essais correspondant au total des combinaisons des deux niveaux des n variables.

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

Afin de simplifier l'écriture de toutes les combinaisons, il faut définir un nouveau système de coordonnées en prenant pour origine le point d'intersection des valeurs moyennes entre les deux niveaux de chaque variable.

Soit $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, les n variables et $x_{11}, x_{21}, \dots, x_{n1}, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{n2}$.

les valeurs "inférieure" et "supérieure" de n variables.

Le nouveau système de coordonnées défini à pour origine $(0, 0, \dots, 0)$ le point

$$\left(\frac{x_{11} + x_{12}}{2}, \frac{x_{21} + x_{22}}{2}, \dots, \frac{x_{n1} + x_{n2}}{2} \right)$$

Si l'on substitue aux n variables, les variables réduites

X_1, X_2, \dots, X_n de la forme $(x_{in} + x_{ni}) / \delta x_n$

où $\delta x_n = (x_{n2} - x_{n1}) / 2$ et $n = 1, 2, 3, \dots$

Le domaine expérimental est transformé dans le nouveau système, en un hypercube centré à l'origine $(0, 0, \dots, 0)$ et dont les sommets ont respectivement pour coordonnées $(1, 1, \dots, 1)$.

Autour de l'origine, on admet que la grandeur Y dont on étudie la variation peut être développée suivant une fonction polynomiale de X_1, X_2, \dots, X_n

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + \dots + a_{1n} X_1 X_n + a_{23} X_2 X_3 + \dots + a_{2n} X_2 X_n + \dots + a_{123 \dots n} X_1 X_2 X_3 \dots X_n$$

C'est le modèle du premier ordre

les 2^n manipulations fournissent 2^n valeurs de Y et permettent donc de déterminer les valeurs des 2^n coefficients a de l'équation précédente.

III.4 DÉFINITION DES EFFETS PRINCIPAUX ET DES INTERACTIONS

L'effet d'un facteur est défini comme la variation de la réponse provoquée par un changement de niveau de ce facteur dans un plan factoriel 2^k , chaque facteur possède quatre effets simples.

La moyenne de ces quatre effets simples représente l'effet global moyen d'un facteur et caractérise l'influence de ce facteur.

Les interactions correspondent à l'effet simultané de deux ou plusieurs facteurs.

Chapitre Six : Généralités Sur La Modélisation

L'intersection du premier ordre entre deux facteurs peut se calculer à partir de la différence entre l'effet principal du premier de ces deux facteurs pris au niveau supérieur de l'autre, et l'effet principal de ce même facteur au niveau inférieure de l'autre.

VLS INTERACTION DE DEUX FACTEURS

L'un des avantages de la planification factorielle est de connaître non seulement les effets indépendants de chaque variable mais aussi les interactions entre variables .

Physiquement qu'est ce que c'est l'interaction de deux facteurs?

On considère les variables x_1, x_2, x_3, \dots , si l'effet du changement de x_1 est la même pour deux niveaux du changement de n il n'y a pas d'interactions entre x_1 et x_2

par contre si l'effet du changement de x_1 n'est pas le même pour les deux niveaux de x_2 alors, on dira que x_1 et x_2 interagissent.

Dans ce cas, l'effet d'un facteur ou variable, il y a trois interactions de deux facteurs $x_1, x_2 (E_{12}), x_2 x_3 (E_{13}), x_2 x_3 (E_{23}),$

E_{12}, E_{13}, E_{23} sont représentés dans la figure ()

Partie Expérimentale

Chapitre Un :

Mode Opérateur

I.1 APPAREILLAGE :

L'appareillage utilisé dans nos expérimentations est schématisé sur la figure N°1 : , nous décrirons les différentes parties essentielles et la préparation dans le cas de la colonne;

I.1.1 PRÉPARATION DE LA COLONNE

La colonne utilisée est une colonne en inox de 1.5 cm de diamètre intérieur et de 25 cm de hauteur . Elle joue aussi le rôle d'électrode .

La 2^{ème} électrode est une tige en inox placée au centre de la colonne Voir schéma N°2

Les étapes suivies pour chaque manipulation sont :

- 1 Peser la quantité d'alumine correspondant à la hauteur du lit
- 2 Tremper l'alumine activée dans l'eau distillée pendant au moins 24 heures . cela afin d'assurer une bonne mouillabilité des particules et empêcher ainsi le colmatage du lit.
- 3 Remplir la colonne par la solution alumine activée-eau
- 4 Les débits d'alimentation sont maintenus constants à l'aide d'une pompe péristaltique.

On a installé un débit d'aspiration en bas de la colonne par la même pompe pour limiter la perte de charge et maintenir une hauteur d'eau constante , ainsi on évite le problème qui s'est posée pour TOUATI [12] l'an passé.

Figure N°1

Dispositif expérimental

- 1 Générateur
- 2 Colonne
- 3 Bac d'alimentation en eau chargée
- 4 pompe peristaltique
- 5 Bac de récupération d'eau traitée
- 6 Solution de KCl 3M
- 7 Electrodes
- 8 Pont salin

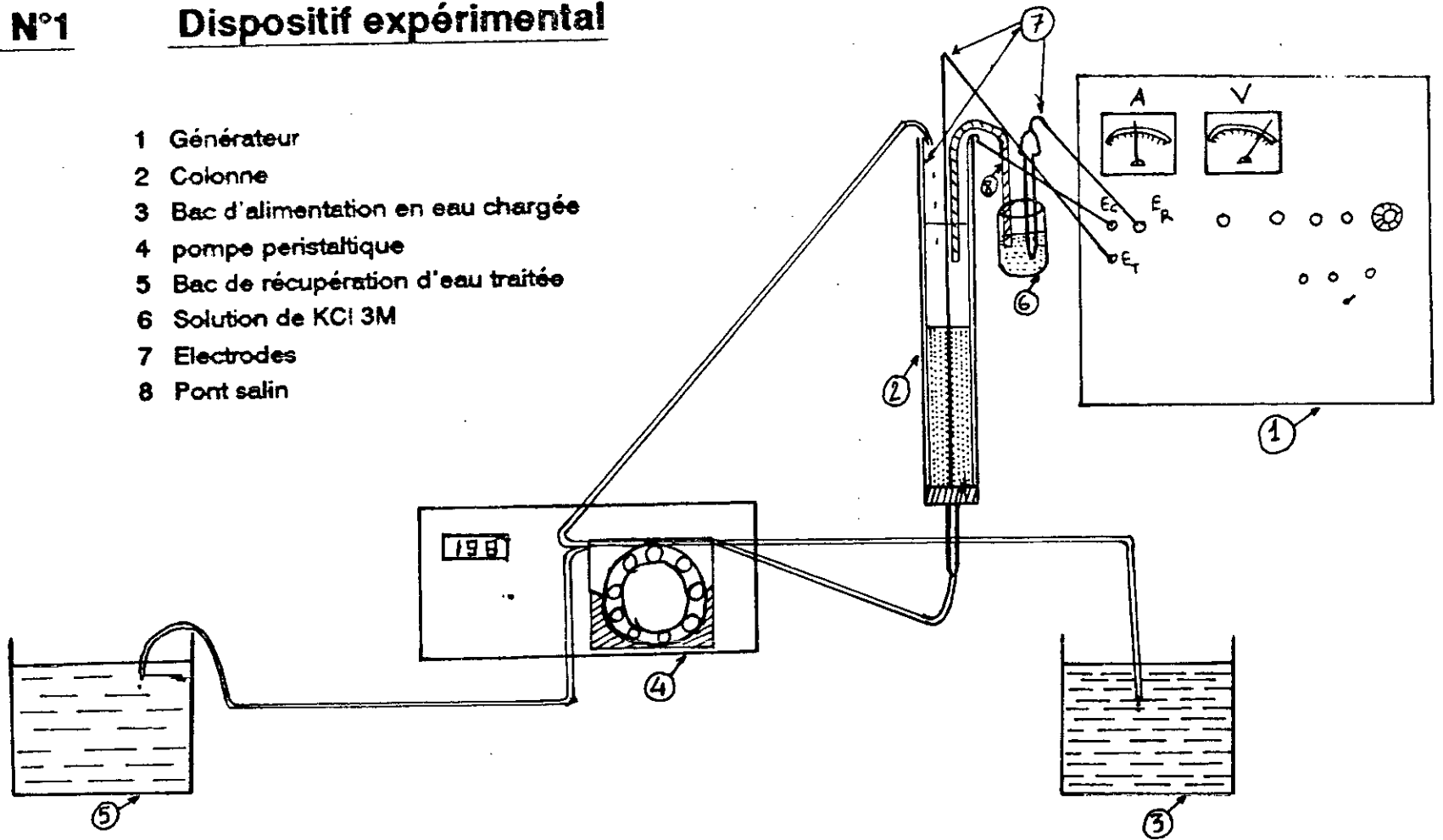
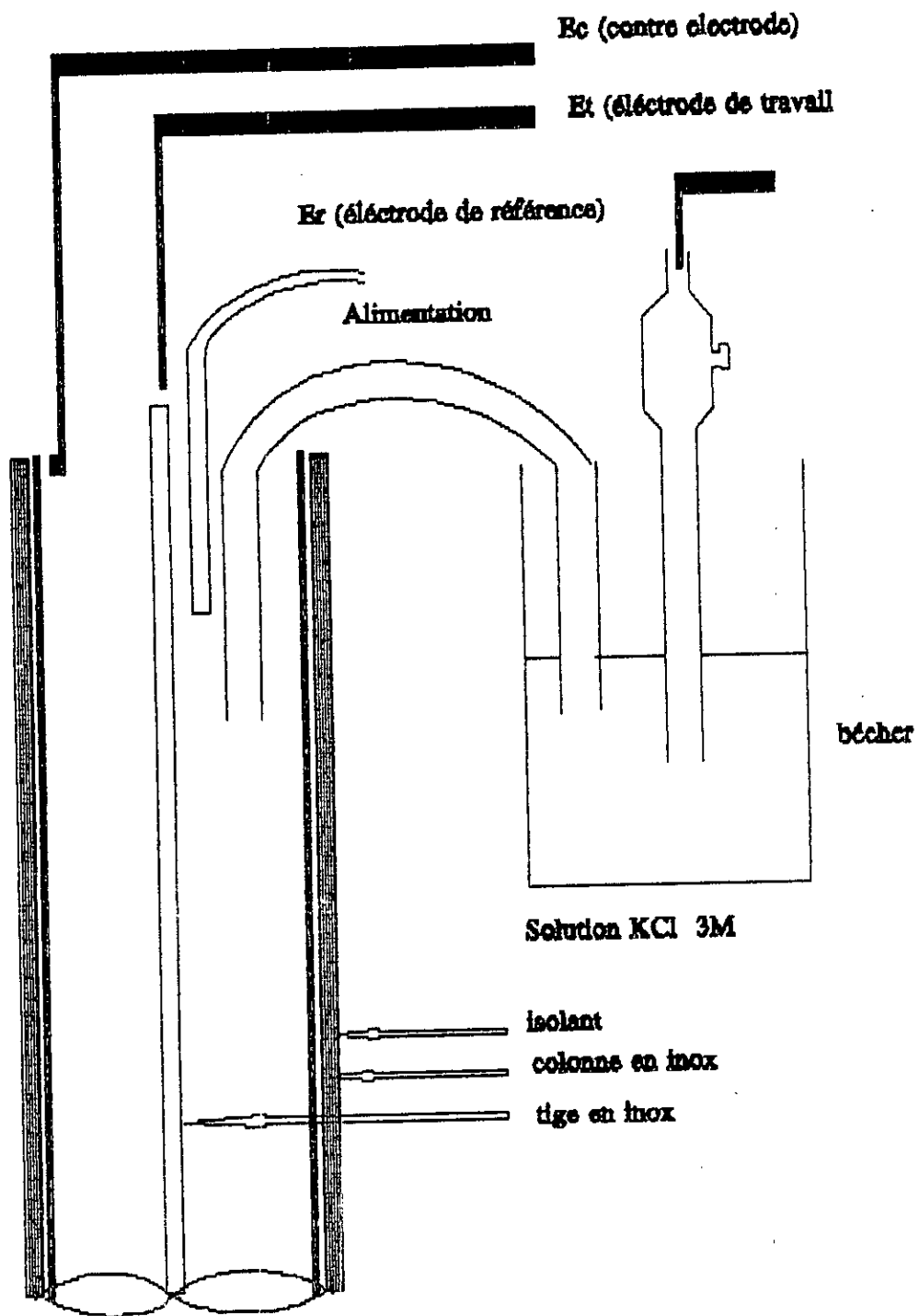


Figure N° 2



1.1.1.2 Générateur

Le générateur utilisé a 3 entrées

- 1 E_r pour l'électrode de référence
- 2 E_t pour l'électrode de travail
- 3 E_c pour la contre électrode.

Le circuit E_r E_c permet de calculer le potentiel appliqué par rapport à l'électrode de Calomel saturée E/E_{sc} .

Le circuit E_t E_c permet de calculer l'intensité de courant (I). Ce générateur permet l'alimentation du système par une potentiel contrôlé.

1.2 PRÉPARATION DE L'EAU D'ALIMENTATION :

L'eau traitée au cours de nos expériences est une eau distillée chargée artificiellement en fluorure de Sodium NaF à des concentrations désirées.

1.3 MÉTHODE D'ANALYSE

Le dosage des ions fluorures s'effectue à l'aide d'une électrode à membrane monocristallin type PF_{11} . Cette électrode est spécifique aux ions F^- ; elle permet de limiter les interférences avec les autres anions contrairement aux autres méthodes d'analyse.

1.3.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉLECTRODE

- 1/ Limite de détection 10^{-8} M/l (0.2 $\mu\text{g/l}$)
- 2/ Domaine de linéarité de $5 \cdot 10^{-6}$ M/l à 1 M/l
- 3/ Domaine de température 0 à 50 °C
- 4/ Domaine du pH : 0 à 8 pH de mesure recommandé égal à 5.3
- 5/ Temps de réponse : de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes suivant la concentration en ions fluorures et le milieu de mesure
- 6/ L'électrode doit être conservée dans une solution 10^{-3} à 10^{-6} M/l en ions F^- dans du tampon "Tafic".

1.3.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ÉLECTRODE :

L'électrode à membrane monocritalline type PF_{11} est destinée à mesurer l'activité des ions fluorures libres en solutions . La membrane de cette électrode est constituée par un monocristal de fluorure de lanthane LaF_3 , dopé à l'Europium.

Cette électrode est très sélective , sauf vis à vis des ions OH^- .

Si l'on plonge une électrode dans une solution contenant des ions fluorures , il s'établit à sa surface active un potentiel proportionnel au logarithme de l'activité des ions F^- libres ; selon la loi de NERNST.

$$E = E_0 - 2.3 \frac{RT}{F} \log a_F$$

E : Potentiel mesuré à l'électrode.

E_0 : Potentiel standard de l'électrode qui dépend de son élément interne de référence , de sa solution interne de remplissage , et de l'électrode de référence à laquelle , elle est associée.

2.3 RT / F : Facteur de NERNST (59.16 mV à 25 °C).

1.3.3 MESURE DIRECTE

Lorsqu'on utilise cette méthode , il est d'abord nécessaire de procéder à un étalonnage de l'électrode . Cette opération est réalisée en mesurant le potentiel pour différentes concentrations en ions fluorures. Les solutions étalons doivent toutes présenter la même force ionique et s'il y a lieu , et s'il y a lieu , la même concentration en agent complexant .

Si la force ionique de l'échantillon à analyser est faible ou inconnue , on devra procéder à un ajout permettant d'ajuster sa force ionique globale (et son pH) à une valeur identique à celles des solutions étalons .

D'une façon générale , il est souhaitable que les solutions utilisées pour l'étalonnage et les échantillons soient rendues aussi semblables que possible entre elles.

On peut satisfaire à ces conditions par l'ajout d'un agent complexant appelé TISAB

1.3.4 PRÉPARATION DU TAMPON TAFIC "TISAB"

Placer environ 700 ml d'eau distillé dans un bêcher d'un litre; Ajouter 57 ml d'acide acétique glacial, 58 g de chlorure de sodium NaCl et 4 g de CDTA ou 0.3 g de citrate de sodium .

Ajuster le pH avec de la soude 5 M , jusqu'à ce que celui ci soit égale à 5.3 . refroidir la solution à la température ambiante . Ajuster le volume totale à 1 l avec de l'eau distillée dans une fiole jaugée.

1.3.5 TRACÉ DE LA COURBE D'ETALONNAGE :

On effectue pour chaque solution étalon une mesure de potentiel . Toutes les lectures de potentiel sont faites après stabilisation des potentiels d'électrodes . Il est noter qu'il est préférable de faire les mesures sur les solutions étalons dans l'ordre des concentrations croissantes (afin d'éviter les phénomènes de mémoire de l'électrode ainsi que les risques de pollution des solutions [25].

Derrière

Tracer de la courbe d'étalonnage
 $E \text{ (mV)} = f(\log C)$

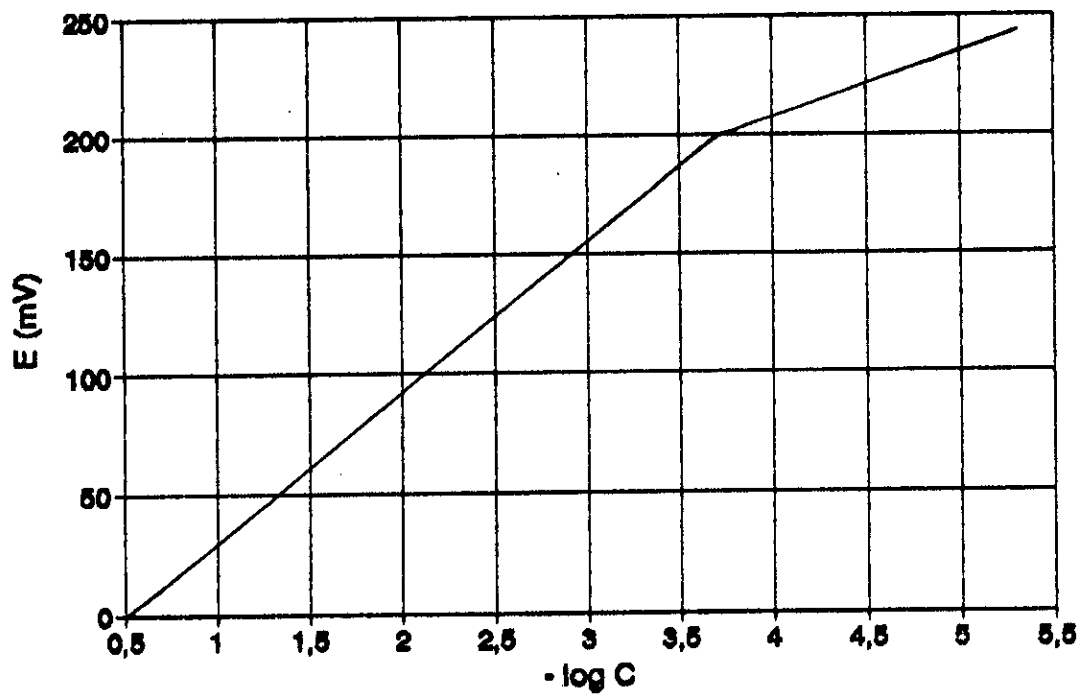


Figure N°: 4

1.4 PARAMÈTRES D'ÉTUDES

1.4.1 GRANULOMÉTRIE DU MATÉRIAU FILTRANT

Dans notre travail on n'a pas pu voir l'influence de la granulométrie sur la capacité d'élimination du fluor à cause de la non disponibilité du matériau . La seule gamme de granulométrie disponible , se situe entre 0.063 et 0.105 mm. Mais vu la bibliographie , on peut dire qu'on n'est pas très loin des conditions optimales [20], en ce qui concerne la granulométrie du matériau filtrant

1.4.2 pH DE TRAITEMENT

La plupart des autres auteurs tel que CHURCHILL [12] affirment l'existence d'un optimal compris entre 5 et 6.5.

Ces résultats sont ensuite confirmés par les essais de MAZOUNIE [16] . En effet pour le traitement d'une eau brute dont le pH a été ajusté à l'acide sulfurique . On observe une augmentation de la capacité voisine de 50 % entre un traitement à pH 7 et un traitement à pH 5.5 .

Les travaux les plus récents de BULUZU [21] montre que pour un pH compris entre 3 et 6 la différence dans l'efficacité de traitement est mineure ; cette différence augmente dans l'intervalle du pH de 5 à 7 .

1.4.3 CONCENTRATION INITIALE EN FLUOR

Les essais entrepris par SAVENELLI , BLACK, BISCHOP et SANSOUCY puis par MAZOUNIE et enfin BULUZU [14,16,20] ont confirmé l'existence d'une relation entre la capacité de fixation et la teneur et ce au moins pour des concentrations initiales comprises entre 2.5 et 15 mg.

1.4.4 ALCALINITÉ DE L'EAU BRUTE

Plusieurs auteurs tels que BULUZU , FRANCK et LINDSAY, SAVENELLI , etc [23,25 19] ont démontrées que l'alcalinité

diminue la capacité des fixations F- par l'alumine activée.

1.4.5 DÉBIT VOLUMIQUE

La plupart des auteurs affirment que le fait d'augmenter le débit volumique diminue la capacité d'adaptation [12].

1.4.6 LA HAUTEUR DU LIT FILTRANT

Ce paramètre est très intéressant car il est proportionnel à la quantité d'alumine utilisée aussi qu'au temps de contact entre la solution et l'alumine activée ce qui c*va influencer directement sur la capacité d'élimination.

1.4.7 LA TENSION ENTRE LES DEUX ÉLECTRODES

L'influence du champ électrique sur l'adsorption n'est pas connue jusqu'à présent , cest à dire qu'on a pas trouvé de publications sur ce phénomène . Par contre on a vu dans la partie théorique les travaux qui s'effectuent actuellement pour voir l'effet de l'énergie électrique sur certains procédés de traitement afin d'introduire cette énergie dans le traitement des eaux.

Pour cela notre travail se base sur l'effet du champ électrique sur l'adsorption et sur la possibilité de régénération de changement de polarité.

Chapitre Deux:

Résultats & Discussion

CHAPITRE DEUX :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

II.1 INFLUENCE DU CHAMPS ELECTRIQUE

III.1.1 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour un débit volumique de 15 ml/mn, une concentration de 10 mg/l une hauteur du lit de 5.5 cm, on fait varier la tension appliquée de 0 à 1000 mV/E₀.

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Tableau N° 5

E/E₀ : 0 mV , I = 0.0 mA

| Temps en [mn] | 30 | 60 | 90 | 120 | 160 | 180 | 200 | 220 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (E/E ₀) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.15 |
| Temps en [mn] | 240 | 260 | 280 | 310 | 340 | 370 | 430 | |
| (E/E ₀) | 0.20 | 0.22 | 0.25 | 0.25 | 0.30 | 0.30 | 0.25 | 0.25 |

Tableau N°6

E/E₀ : 250 mV , I = 25.5 mA

| Temps en [mn] | 50 | 100 | 150 | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (E/E ₀) | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| Temps en [mn] | 280 | 320 | 360 | 420 | | | | |
| (E/E ₀) | 0.40 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | | | | |

Tableau N°7

E/E₀ : 500 mV , I = 48.9 mA

| Temps en [mn] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| (E/E ₀) | 0.40 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.50 | 0.50 |
| Temps en [mn] | 210 | 240 | 265 | 300 | 320 | 340 |
| (E/E ₀) | 0.50 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.55 |
| Temps en [mn] | 360 | 390 | 430 | 480 | 540 | / |
| (E/E ₀) | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 |

Tableau N° 8

E/E_{cc} : 750 mV , I = 73.5 mA

| | | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en [mn] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| [P ²⁺] en mg/l | 0.18 | 0.28 | 0.30 | 0.53 | 0.68 | 0.68 |
| Temps en [mn] | 210 | 270 | 290 | 310 | 330 | 370 |
| [P ²⁺] en mg/l | 0.60 | 0.60 | 1.51 | 3.23 | 4.35 | 6.29 |
| Temps en [mn] | 390 | 420 | 480 | 540 | / | / |
| [P ²⁺] en mg/l | 7.22 | 7.56 | 7.69 | 7.92 | / | / |

Tableau N°9

E/E_{cc} : 1000 mV , I = 97.3 mA

| | | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en [mn] | 47 | 80 | 110 | 140 | 170 | 190 |
| [P ²⁺] en mg/l | 0.28 | 0.35 | 0.50 | 0.75 | 0.83 | 0.83 |
| Temps en [mn] | 210 | 230 | 250 | 270 | 290 | 310 |
| [P ²⁺] en mg/l | 0.86 | 0.83 | 0.95 | 0.86 | 1.33 | 2.07 |
| Temps en [mn] | 340 | 370 | 400 | 430 | 480 | 560 |
| [P ²⁺] en mg/l | 5.74 | 6.58 | 6.90 | 7.22 | 7.98 | 7.14 |

Ces résultats nous ont permis de tracer l'évolution de la concentration de sortie en fonction du temps , les graphes sont représentées sur la figure N°5

II.12 EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Pour déterminer l'influence du champ électrique sur la dynamique d'adsorption on doit déterminer certaines caractéristiques qui sont : la capacité fractionnaire du lit , les temps de percée et de saturation , volumes traités au temps de percée et de saturation , la hauteur de la ZTM , la vitesse de déplacement de la ZTM , capacité d'adsorption au temps de percée et enfin calcul d'énergie consommée ; ceci pour tous les paramètres étudiés.

Evolution de la concentration de sortie en fonction de la tension appliquée

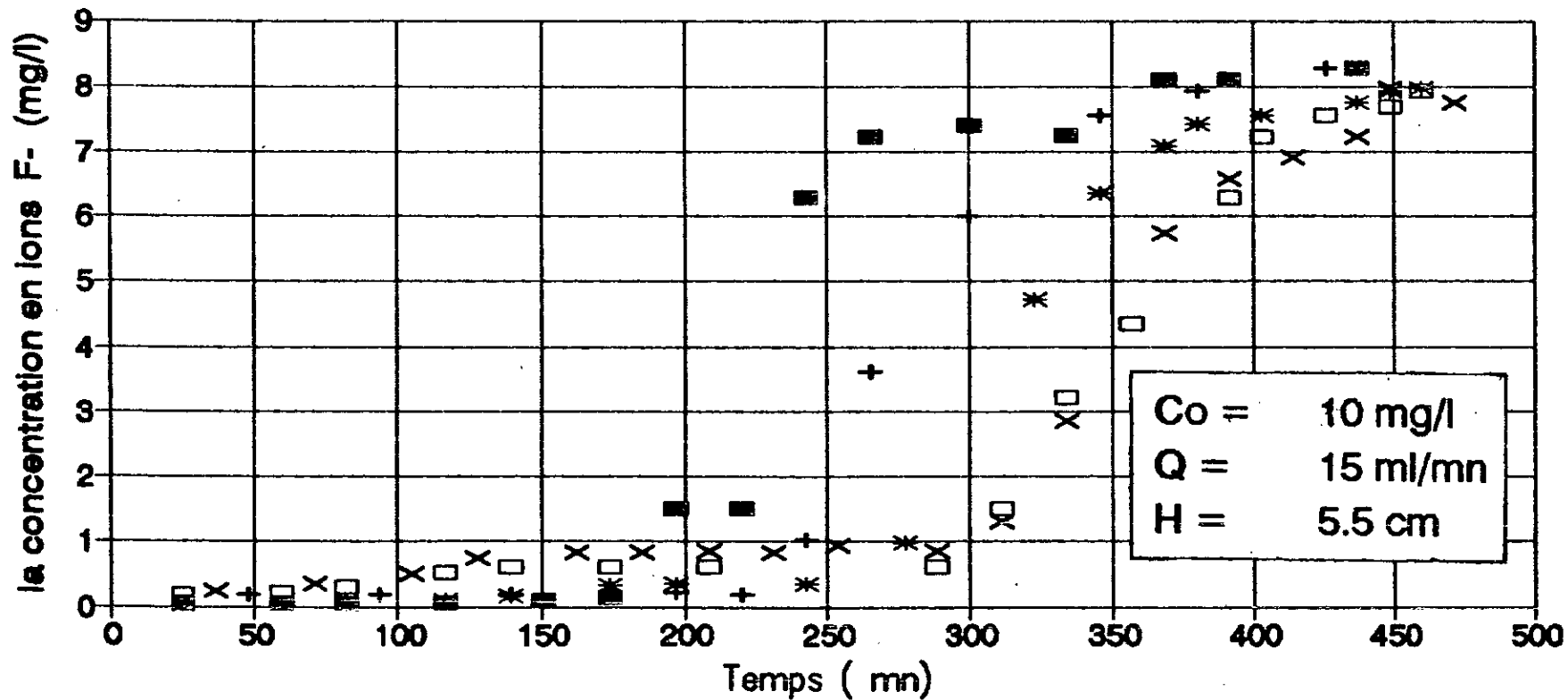


Figure N° : 5

| | | |
|----------------|----------------|---------------|
| ■ E(mV) = 0.00 | + E(mV) = 250 | * E(mV) = 500 |
| □ E(mV) = 750 | × E(mV) = 1000 | |

a) La capacité fractionnaire:

La capacité fractionnaire d'un lit mesure l'efficacité d'élimination de l'adsorbant. Elle indique quelle est la fraction de solide qui participe au phénomène d'adsorption. On la définit comme étant la quantité d'adsorbant effectivement éliminée par rapport à la capacité potentiel d'élimination de l'adsorbant à l'intérieur de la zone de transfert de matière [11].

Pour calculer cette capacité fractionnaire on utilise l'équation [1] de la partie bibliographique.

Tableau N° 10

| E/Ecs (mV) | 0.0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|------------|-----|-----|-----|-----|------|
| F % | 55 | 56 | 56 | 57 | 60 |

b) Temps de percée et de saturation

Le temps de percée et de saturation sont les temps au bout desquels la concentration de sortie atteint respectivement 1 et 7.5 mg/l dans notre cas.

Les valeurs de ces temps sont donnés dans le tableau suivant N° 11.

Tableau N° 11

| E/Ecs (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|------------|------|------|------|------|------|
| tp en h:mn | 3:16 | 4:00 | 4:25 | 4:42 | 4:48 |
| ts en h:mn | 4:40 | 5:20 | 6:10 | 7:00 | 7:50 |

c) Volume traités au temps de percée et de saturation

Les volumes traités aux temps de percée de saturation sont donnée par les équations suivantes

$$V_p - Qt_p$$

$$V_s - Qt_s$$

Ce calcul nous permet d'avoir les résultats suivants :

Tableau N° 12

| E/Ecs (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|------------|------|------|------|------|------|
| V_p (l) | 2.94 | 3.60 | 3.98 | 4.23 | 4.32 |
| V_s (l) | 4.20 | 4.80 | 5.55 | 6.30 | 7.05 |

d) hauteur de la ZTM Hz

La hauteur de la zone de transfert de matière est considérée comme une vitesse d'adsorption plus la hauteur est faible plus l'adsorption est meilleure.

On peut calculer cette hauteur par l'équation 4 (voir la partie bibliographique).

Tableau N° 13 :

| E/Ecs (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|-------------|------|------|------|------|------|
| H_z (cm) | 1.90 | 1.54 | 1.79 | 2.10 | 2.52 |

e) Vitesse de déplacement de la ZTM (U_z)

La vitesse de déplacement de la ZTM est l'une des caractéristiques les plus importantes , elle détermine le temps de fonctionnement du lit.

Tableau N° 14 :

| E/Ecs (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| U_z (cm/h) | 1.36 | 1.16 | 1.02 | 0.91 | 0.83 |

f) Capacité d'adsorption au temps de percée

C'est la quantité de fluor éliminée au point de percée par gramme d'alumine activée, elle est calculée graphiquement ou à partir de l'équation suivante :

$$X_p = \int_0^{V_p} \frac{(C_0 - C_1)}{m} dV = \frac{QC_0 t_p - Q \int_0^{t_p} C_1 dt}{m} \quad (11)$$

avec Q : Débit volumique (l/h)

C_1 : Concentration instantanée en ion F^- (mg/l)

m : Masse d'alumine activée (g)

t_p : Temps de percée correspondant à 1 mg/l

La masse d'alumine correspondant à la hauteur de 5.5 cm et $m = 7$ g, les résultats de calcul sont données dans le tableau suivant :

Tableau N° 15 :

| $E/E_{0.05}$ (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| X_p (mg(F^-)/g (AA)) | 4.17 | 5.11 | 5.65 | 6.00 | 6.14 |

L'évolution des caractéristiques des courbes des percées sont données par les figures 6, 7, 8, 9, 10.

g) L'énergie consommée

En plus des paramètres précédents pour déterminer le potentiel optimal et dans ce cas l'intensité optimale ; On doit calculer l'énergie consommée lors de chaque manipulation. Ce calcul va nous aider dans le bilan économique

La relation qui permet de déterminer cette énergie

$$U = \frac{EIt}{V} = \frac{EI}{Q}$$

Evolution de la capacité fractionnaire en fonction de la tension appliquée

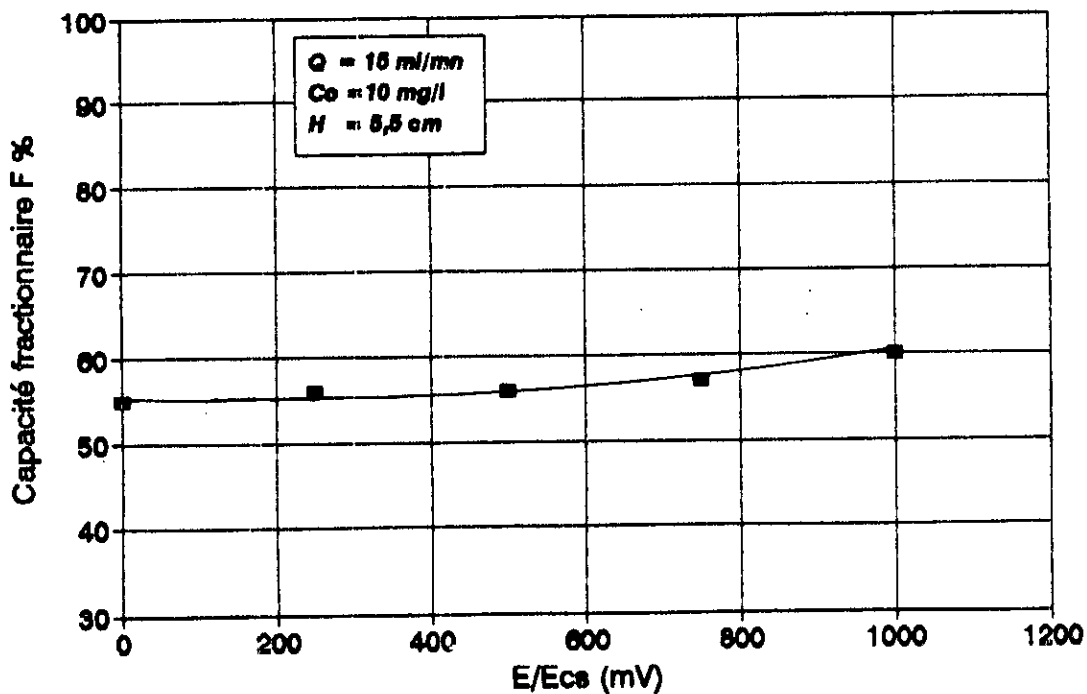


Figure N° : 06

Evolution de Vp et Vs en fonction de la tension appliquée

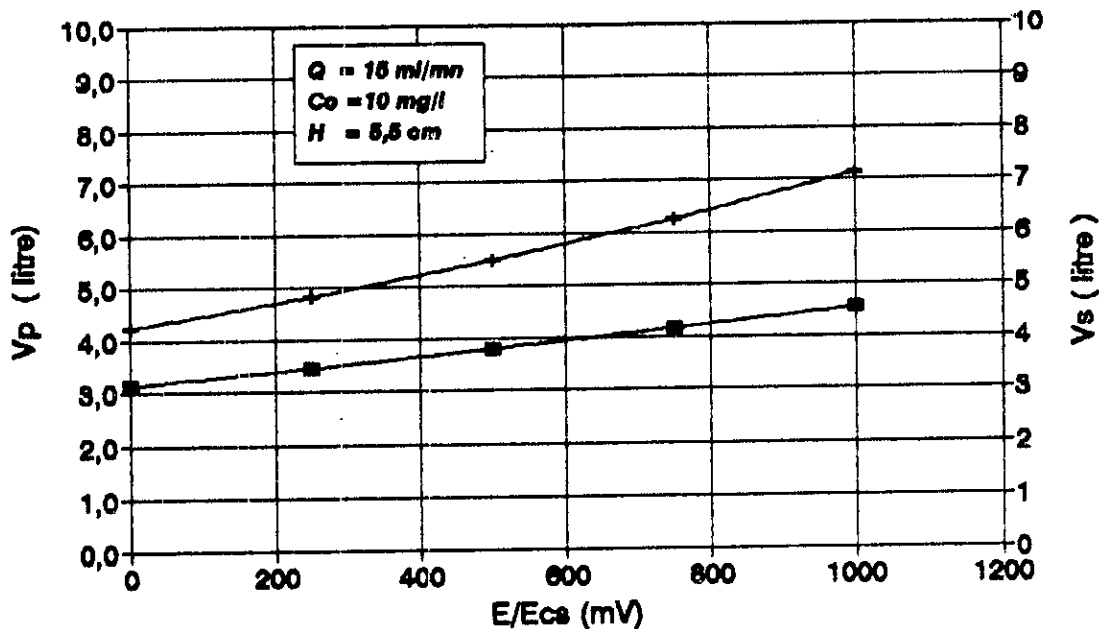


Figure N° : 07

■ Vp (litre) + Vs (litre)

Evolution de la hauteur de la ZTM (Hz) en fonction de la tension appliquée

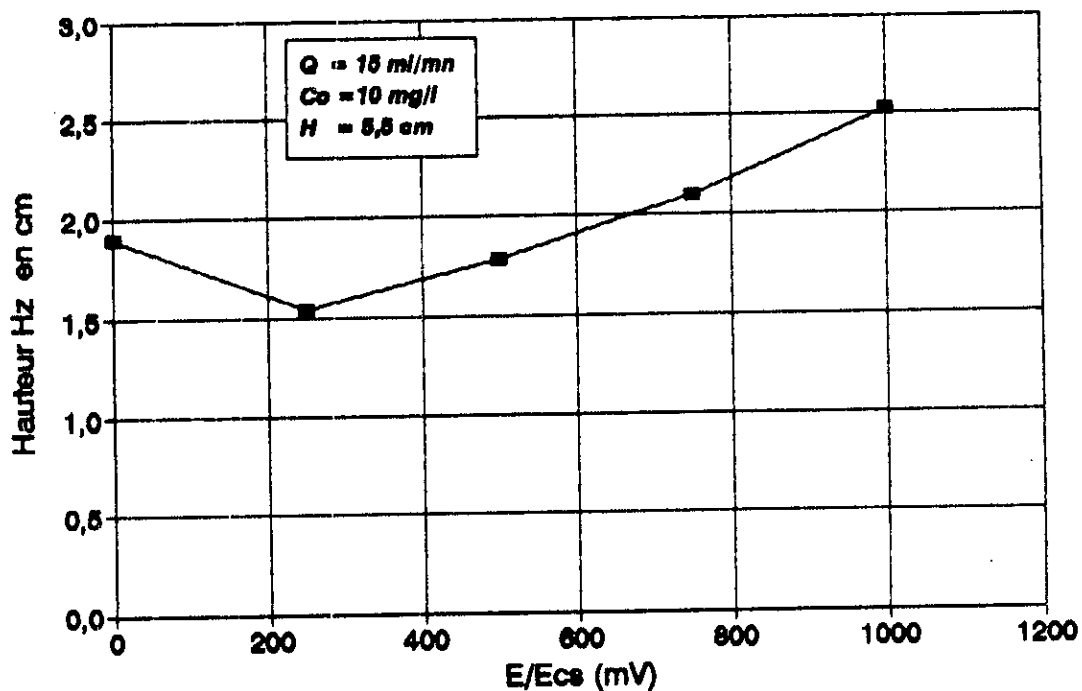


Figure N° 08

Vitesse de déplacement de la ZTM (Uz) en fonction de la tension appliquée

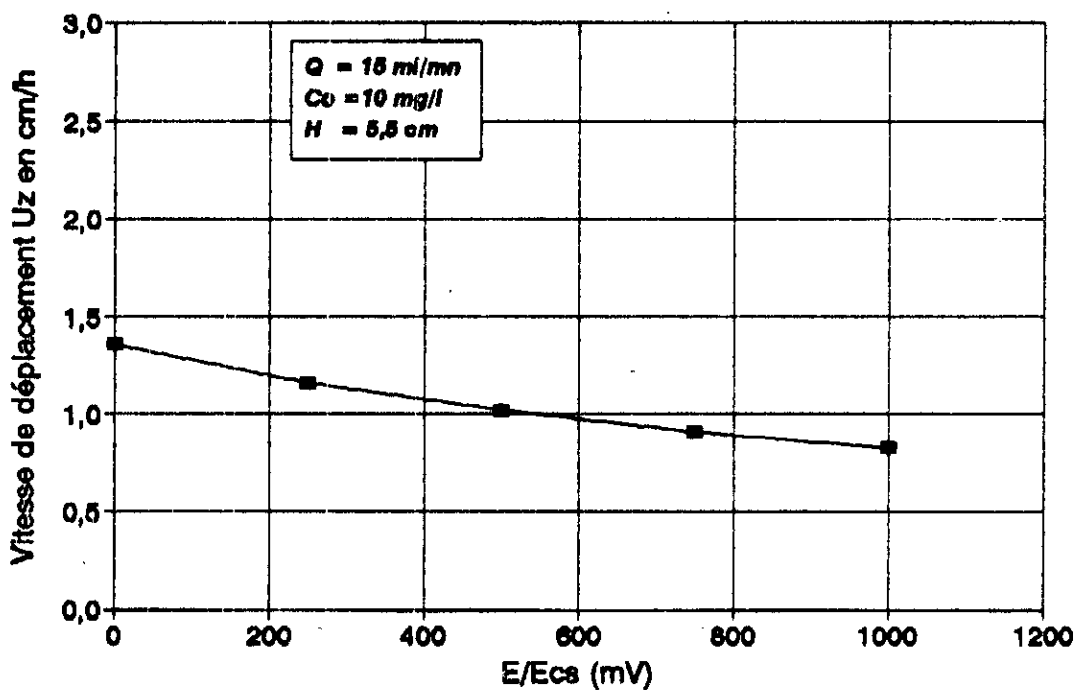


Figure N° 09

la capacité d'adsorption X_p en fonction de la tension appliquée

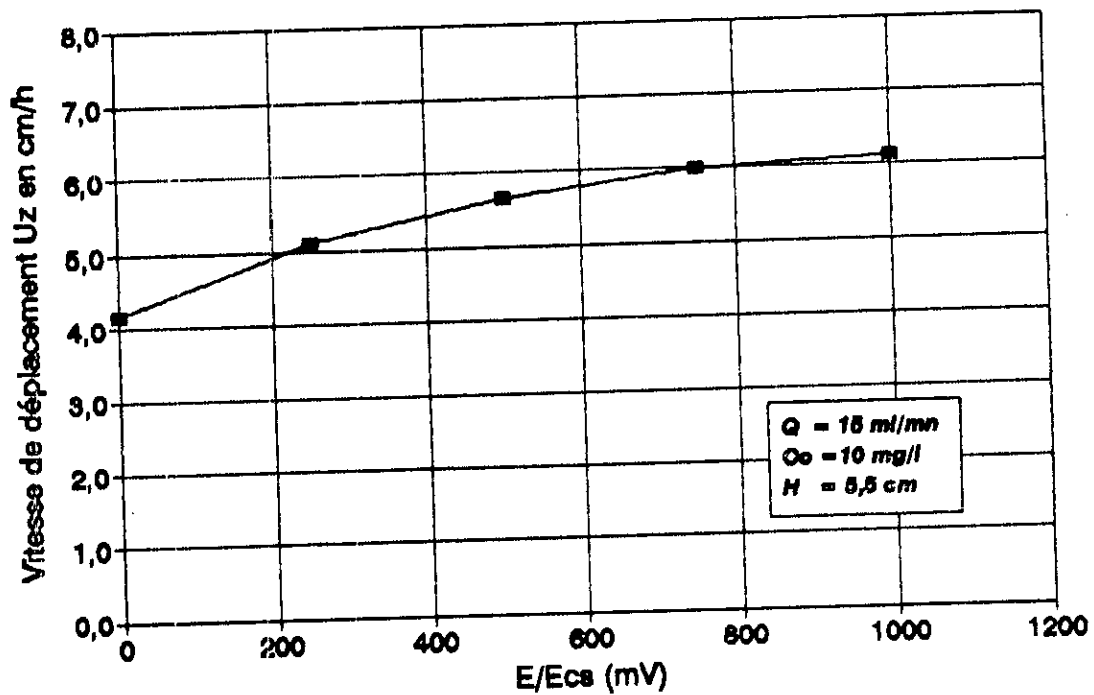


Figure N° 10

- U : Energie consommée (KWh /m3)
 E: Tension appliquée entre les deux électrodes en (Volt)
 Q: Débit volumique en (m3/h)
 I: Intensité de courant en (A)
- Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau N° 16

| E/E _{cs} (mV) | 0 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
|------------------------|----|------|-------|-------|--------|
| U (KWh/m3) | 00 | 7.08 | 27.16 | 61.25 | 108.11 |

Remarque :

On doit ajouter à ces valeurs d'énergie un facteur correctif qui est du au potentiel de l'électrode de calomel saturée .

Le potentiel réel est

$$E_{(R\theta\theta l)} = EIE_{cs} + E_{cs} \quad (12)$$

II.1.3 Discussion des résultats :

1 Capacité fractionnaire F

Le fait d'augmenter le potentiel entre les deux électrodes n'entraîné pas une amélioration notable de la capacité fractionnaire (F) ce qui veut dire que F est une caractéristique du système (adsorbant- adsorbat)

2 volume de percée :

Le volume de percée augmente avec l'intensité du champ électrique jusqu'à une valeur limite qui dans notre cas peut être prise égale à 4.5 l. pour une potentiel supérieur à 1000 mV on a remarqué le phénomène d'électrolyse qui limite notre champs d'action.

3 Volume de saturation

Le volume de saturation augmente avec l'intensité du champ ceci est du à :

- 1) La stabilisation du volume de percée qui entraîne une non saturation du lit
- 2) Le champs électrique fait accélérer le déplacement des ions F- donc une pénétration profonde à l'intérieur des macropores et micropores si c'est possible à la limite . Ce champs par conséquent ne permet pas aux ions un choix préférentiel de site. Ces deux causes vont entraîner une augmentation de la capacité d'adsorption d'ou une augmentation de volume de saturation.

4 Hauteur de la ZTM (HZ)

La hauteur de la ZTM (HZ) augmente avec le champ électrique le fait d'augmenter le champ électrique entraîne une augmentation de la vitesse de déplacement des ions F- et par conséquent une augmentation de l'effet stérique d'ou une augmentation de la hauteur de la ZTM (HZ).

5 Vitesse de déplacement de la ZTM Uz

L'augmentation de HZ entraîne une non saturation des sites d'ou une adsorption à l'intérieur de cette zone et par conséquent une diminution de UZ.

6 La capacité fractionnaire au temps de percée Xp

Xp évolue de la même façon que Vp donc Xp augmente avec le champ électrique jusqu'à atteindre une valeur limite dans notre cas elle peut être égale à 6.15 [mg F-/g d'AA)].

II.2 INFLUENCE DE LA HAUTEUR DU LIT :

II.2.1 Résultats expérimentaux

Pour avoir l'influence de la hauteur du lit sur la dynamique d'adsorption, on a fixé les paramètres autre que la hauteur du lit comme suit :

- Débit volumique $Q = 15$ ml/mn
 - Potentiel entre les 2 électrodes E/Ecs = 0 mV
 - Concentration initiale en ions $F^- = Co = 10$ mg/l
- en faisant varier la hauteur du lit H de 3.5 - à θ cm .

On a obtenu les résultats suivants :

Tableau N° 17 :

a) $H : 3.5$ cm , $M d(A.A) = 5$ g

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en mn | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 165 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.13 | 0.16 | 0.14 | 0.20 | 1.45 | 3.01 |
| Temps en mn | 180 | 195 | 210 | 240 | 270 | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 5.07 | 6.89 | 7.56 | 8.18 | 8.56 | |

Tableau N° 18 :

a) $H : 4.5$ cm , $M d(A.A) = 6$ g

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en mn | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| Temps en mn | 120 | 150 | 170 | 180 | 200 | 220 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.05 | 0.19 | 0.60 | 1.65 | 5.02 | 7.22 |
| Temps en mn | 260 | 300 | 360 | | | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 7.92 | 8.29 | 8.56 | | | |

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau N° 19 :
a) H : 5.5 cm , M d(A.A) = 7 g

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en mn | 30 | 60 | 90 | 120 | 160 | 180 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.05 | 0.05 | 0.45 | 0.05 | 0.11 | 0.14 |
| Temps en mn | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 310 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.51 | 4.15 | 6.29 | 7.22 | 7.39 | 7.75 |
| Temps en mn | 340 | 370 | 430 | | | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 8.10 | 8.10 | 8.29 | | | |

Tableau N° 20 :
a) H : 8.0 cm , M d(A.A) = 10 g

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps en mn | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.07 | 0.08 | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.21 |
| Temps en mn | 210 | 225 | 240 | 260 | 285 | 315 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.26 | 0.30 | 0.33 | 0.41 | 0.66 | 2.58 |
| Temps en mn | 345 | 375 | 420 | 495 | | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 6.05 | 7.15 | 7.69 | 8.06 | | |

Ces résultats nous nous ont permis de tracer l'évolution de la concentration de fluorures libres en fonction du temps voir figure N° (11):

Evolution de la concentration de sortie en fonction de la hauteur du lit

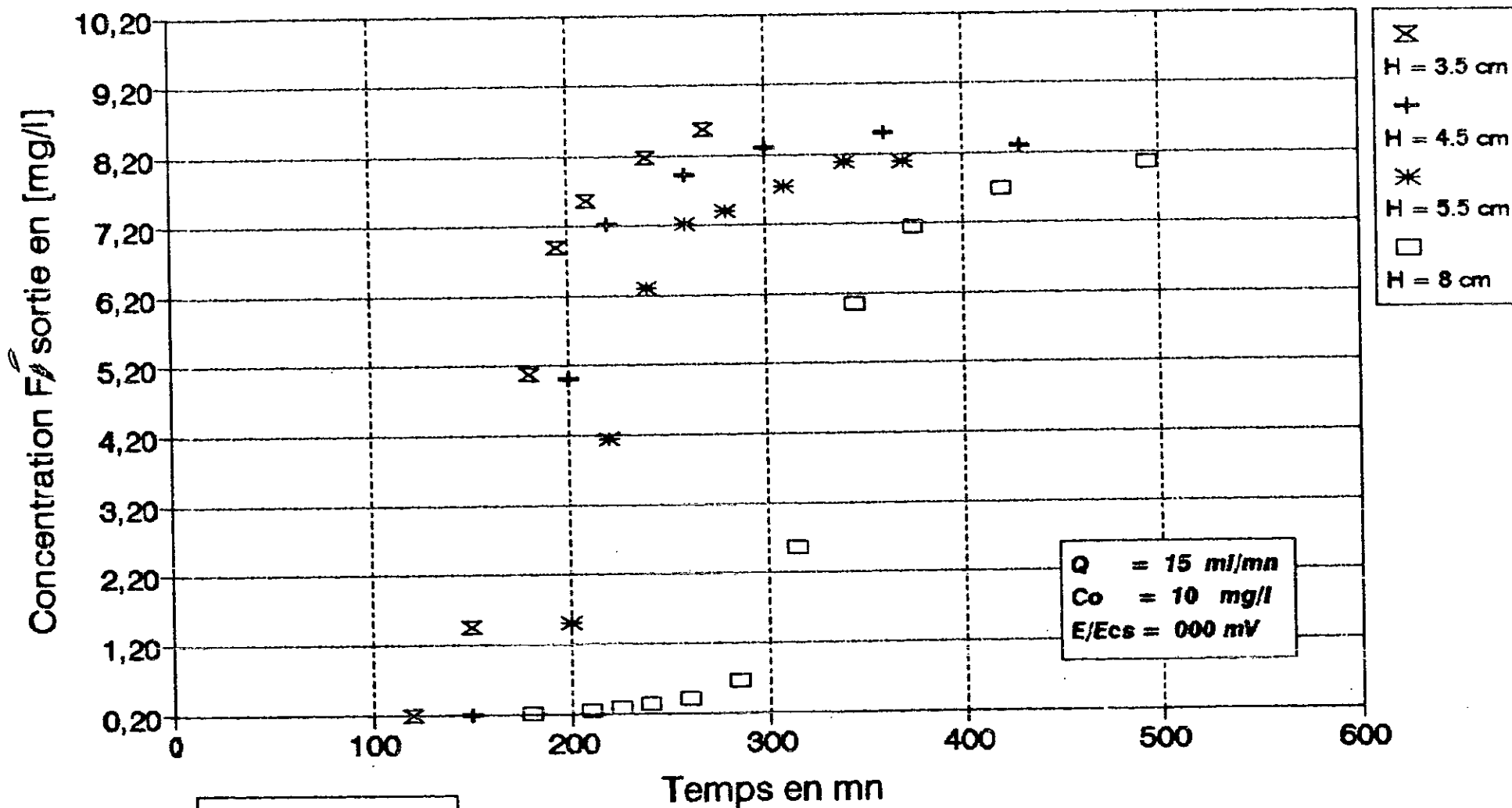


Figure N° 11

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

II.2.2 EXPLOITATION DES RÉSULTATS:

Tableau 21 :

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| H (cm) | 3.5 | 4.5 | 5.5 | 8 |
| Capacité fractionnaire F % | 50 | 53 | 54 | 55 |
| Temps de percée tp (heure) | 2.26 | 2.55 | 3.15 | 4.52 |
| Temps de saturation ts (heure) | 3.24 | 4.00 | 4.40 | 6.40 |
| Volume traité correspondant au temps de percée , Vp (litre) | 2.19 | 2.62 | 2.93 | 4.38 |
| Volume traité correspondant au temps de saturation Vs (litre) | 3.06 | 3.60 | 4.20 | 6.00 |
| Hauteur de la ZTM HZ en cm | 1.16 | 1.40 | 1.93 | 2.45 |
| Vitesse de déplacement de la ZTM cm/h | 1.20 | 1.29 | 1.36 | 1.36 |
| Capacité d'adsorption en temps de percée Xp (mgF ⁻ /g d'AA) | 4.08 | 4.10 | 4.15 | 4.35 |

L'évolution de chacune des caractéristiques des courbes de percées sont représentées dans les figures 12-16

II.2.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

a) Capacité fractionnaire F:

La capacité fractionnaire est pratiquement constante . La variation est de l'ordre de 5 % donc insignifiante , on peut dire que la capacité fractionnaire est indépendante de la hauteur du lit.

Evolution de la capacité fractionnaire en fonction de la hauteur du lit

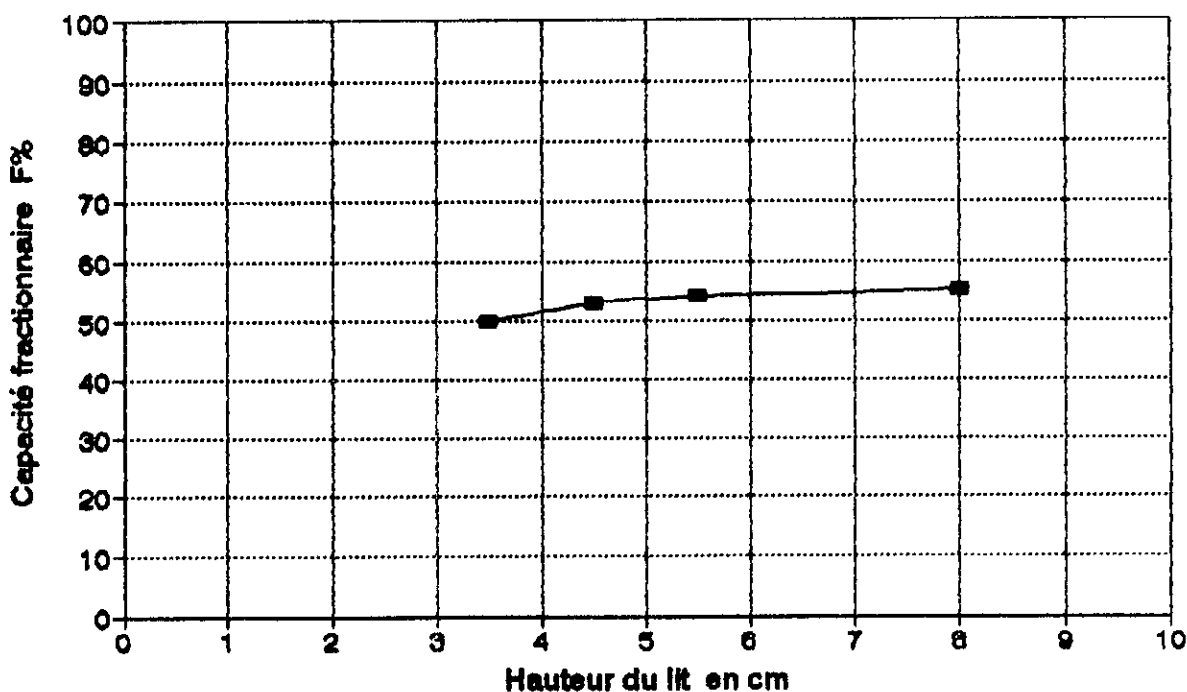


Figure N° : 12

Evolution des volumes traités V_p et V_s en fonction de la hauteur du lit

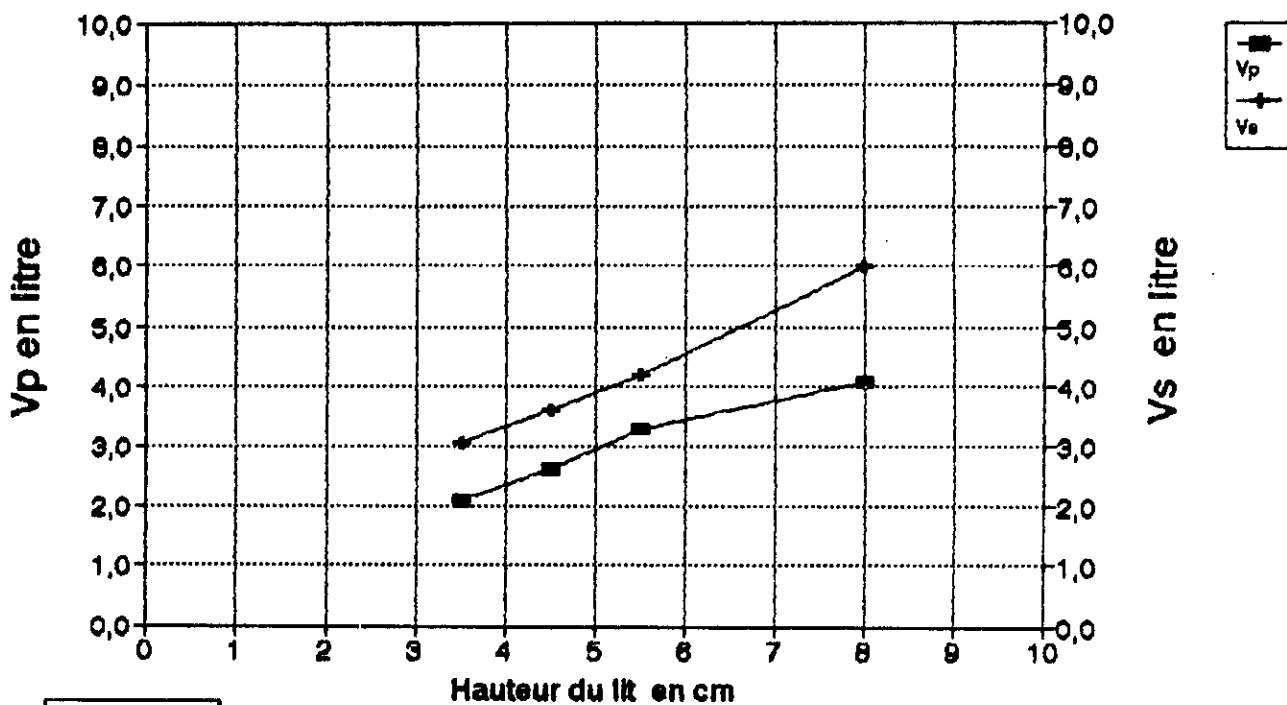


Figure N° : 13

Evolution de la hauteur de la ZTM (Hz) en fonction de la hauteur du lit

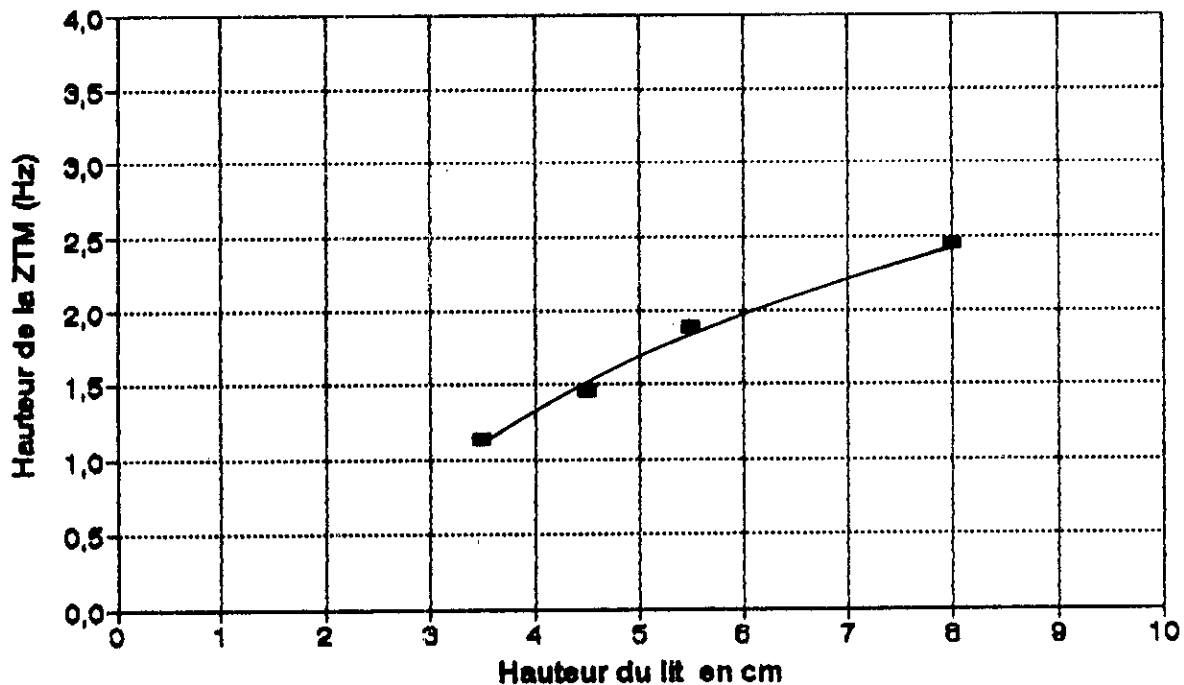


Figure N° : 14

Evolution de la vitesse de déplacement de la ZTM en fonction de la hauteur du lit

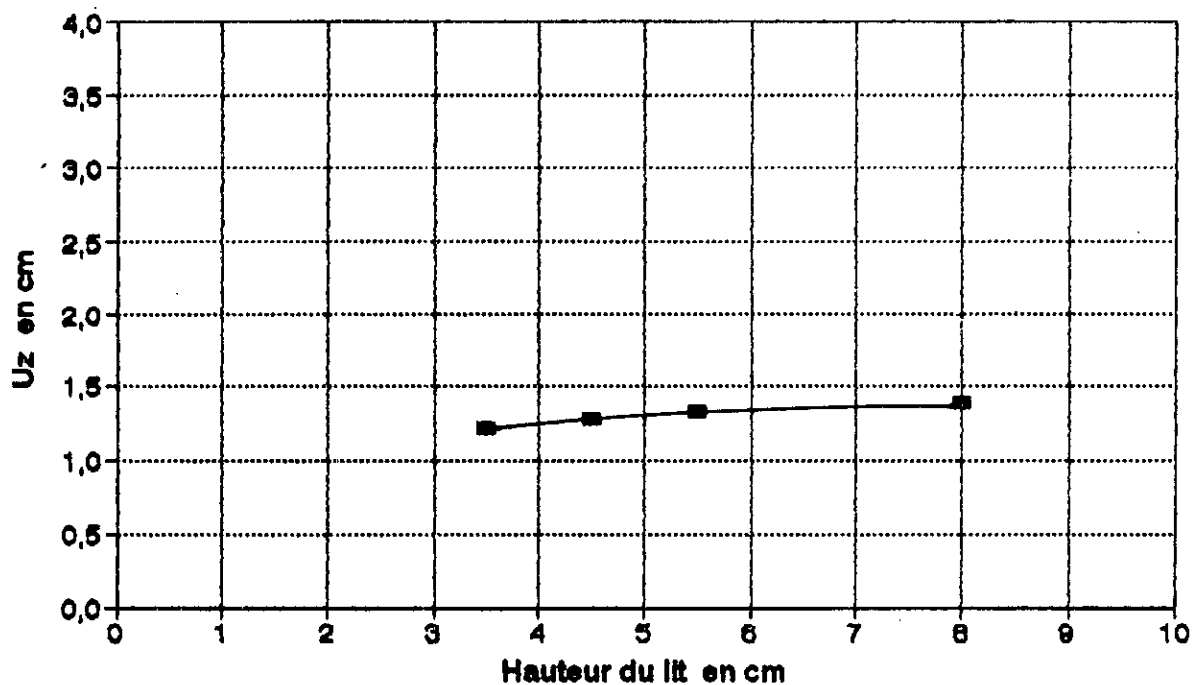


Figure N° : 15

Capacité d'adsorption X_p en fonction de la hauteur du lit

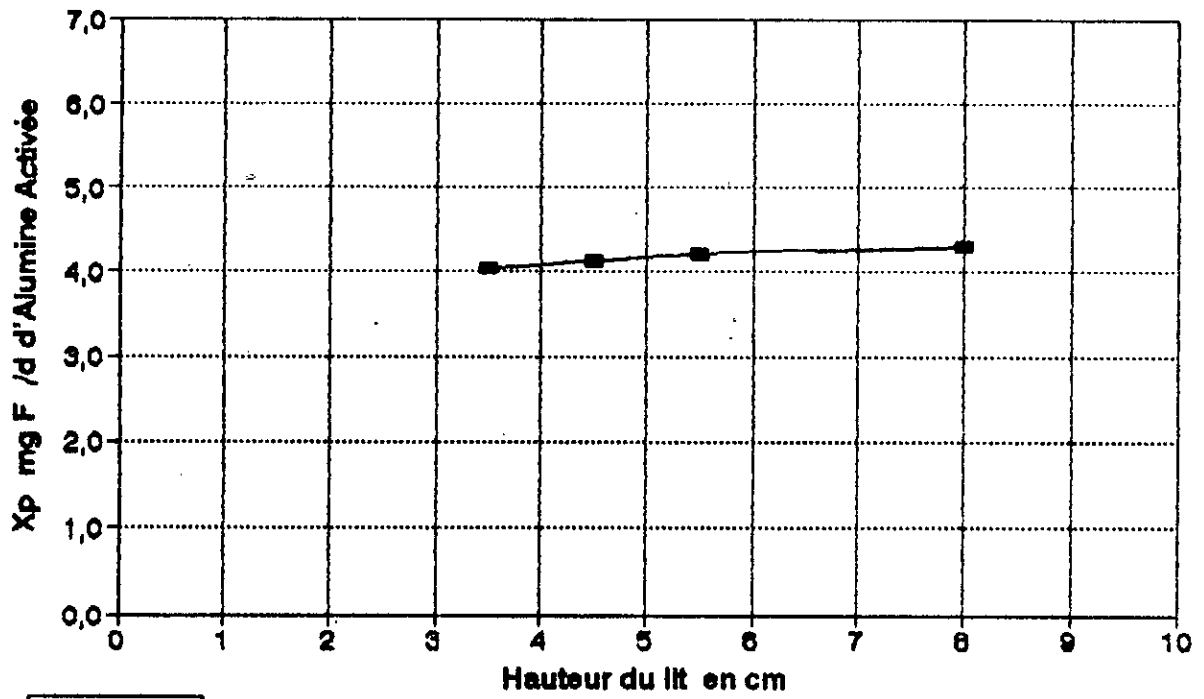


Figure N° : 16

b) Volume de percée V_p :

C'est le volume pour lequel la concentration de sortie atteint 1 mg/l de F^- . Le volume de percée augmente avec la hauteur du lit ceci est dû à l'augmentation de la quantité d'alumine utilisée qui entraîne une augmentation de la capacité d'adsorption du lit.

c) Volume de saturation V_s

C'est le volume pour lequel la concentration de sortie atteint 7.5 mg/l de F^- pour la même raison, le volume de saturation évolue identiquement au volume de percée.

d) Hauteur de la ZTM H_z

La hauteur de la ZTM mesure la vitesse d'échange du soluté entre phases plus rapide est cette vitesse, plus efficace est l'adsorption. A noter que la vitesse d'échange est rapide si la hauteur de la ZTM est faible.

On voit que H_z augmente avec la hauteur du lit cela peut être expliquée par le fait d'augmenter la hauteur on augmente le temps de séjours des ions F^- dans la colonne.

e) vitesse de déplacement de la ZTM U_z

La vitesse de déplacement de la ZTM détermine le temps de fonctionnement du filtre. La rapidité de cette vitesse entraîne une diminution du temps de fonctionnement.

On remarque que U_z est pratiquement constante on peut dire que la hauteur du lit n'influe pas sur la vitesse de déplacement de la ZTM ou bien elle ne change pas d'une manière notable les caractéristiques hydrodynamiques du système.

F) Capacité d'adsorption au temps de percée (X)

La capacité d'adsorption au temps de percée X_p augmente légèrement . En fait en augmentant la hauteur , on améliore l'efficacité d'élimination pour l'établissement de la ZTM d'ou augmentation de la quantité de produit éliminé .

II.3 INFLUENCE DU DÉBIT VOLUMIQUE**II.3.1 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :**

Pour un potentiel entre les deux électrodes fixé à $E/E_{0.} = 500$ mV une hauteur du lit de 5.5 cm ; une concentration d'entrée $C_0 = 10$ mg/l on a fait varier le débit volumique de 15 ml/mn à 30 ml/mn , on a obtenu les résultats suivants :

a) Tableau N°22 :

$Q = 15$ ml/mn (0.9 l/h)

| | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
| [F.] sortie mg/l | 0.04 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.17 | 0.31 | 0.35 |
| Temps mn | 240 | 265 | 275 | 300 | 320 | 340 | 360 |
| [F.] sortie mg/l | 0.35 | 0.98 | 2.00 | 4.73 | 6.35 | 7.08 | 7.42 |
| Temps mn | 390 | 430 | 480 | 540 | | | |
| [F.] sortie mg/l | 7.56 | 7.74 | 7.92 | 7.98 | | | |

b) Tableau N° 23:

$Q = 20$ ml/mn (1.2 l/h)

| | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 50 | 100 | 150 | 180 | 220 | 230 | 250 |
| [F.] sortie mg/l | 0.09 | 0.11 | 0.15 | 0.45 | 1.61 | 2.39 | 4.55 |
| Temps mn | 270 | 290 | 310 | 350 | 430 | 340 | 360 |
| [F.] sortie mg/l | 6.58 | 7.56 | 7.92 | 8.29 | 8.65 | 7.08 | 7.42 |

c) Tableau N° 24:

$Q = 25$ ml/mn (1.5 l/h)

| | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 60 | 120 | 150 | 150 | 190 |
| [F.] sortie mg/l | 0.03 | 0.05 | 0.35 | 0.98 | 3.45 |
| Temps mn | 210 | 250 | 280 | 320 | |
| [F.] sortie mg/l | 7.05 | 7.68 | 8.30 | 8.49 | |

Evolution de la concentration de sortie en fonction du débit volumique

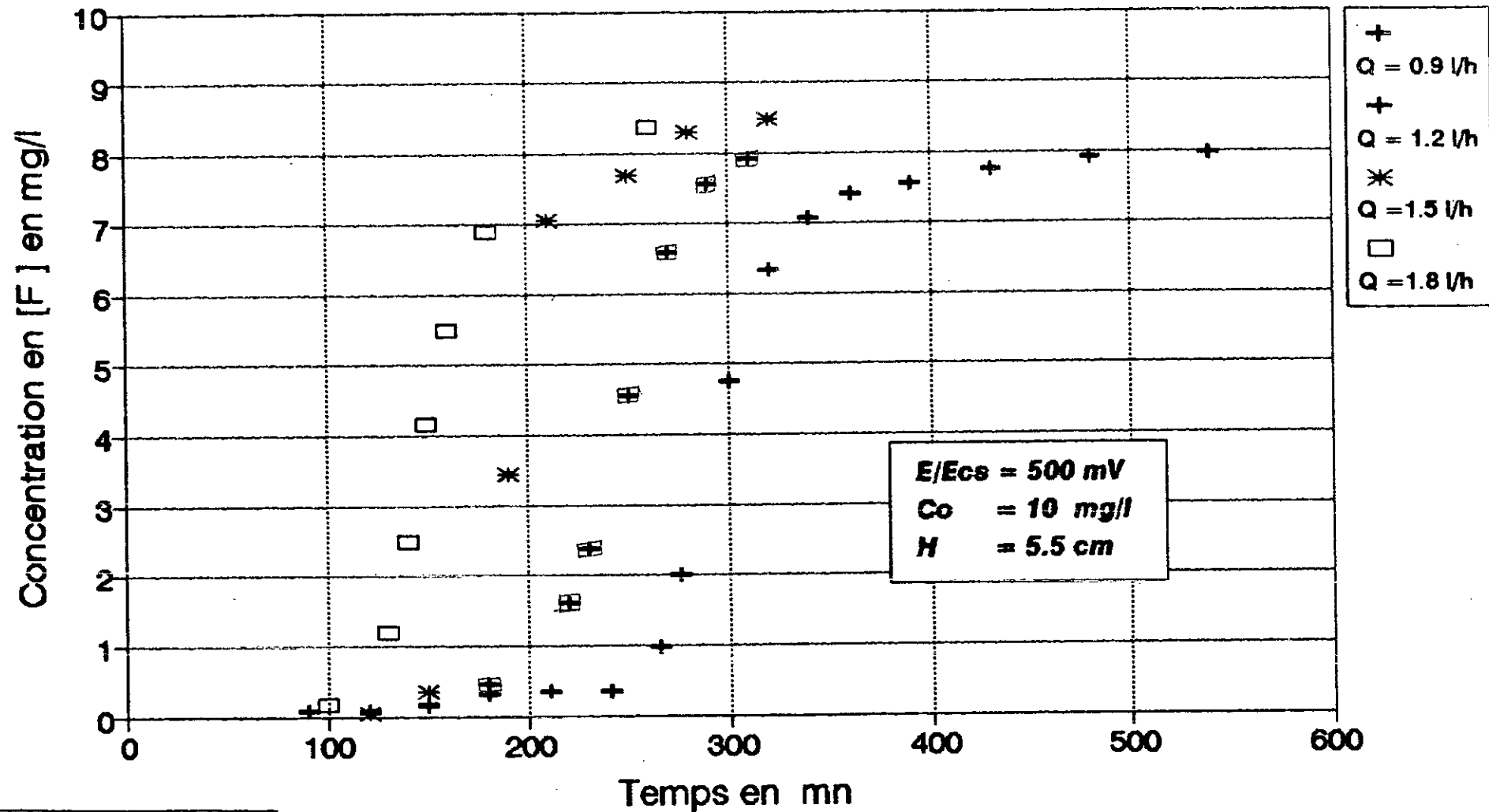


Figure N°: 17

d) Tableau N° 25:
Q= 30 ml/mn (1.8 l/h)

| | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 30 | 60 | 80 | 100 | 120 | 130 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.17 | 0.50 | 1.12 |
| Temps mn | 140 | 150 | 160 | 180 | 190 | 260 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 2.50 | 4.16 | 5.48 | 6.90 | 7.76 | 8.30 |

Ces résultats nous permettent de tracer l'évolution de la concentration en F⁻ libre en fonction du temps voir figure N°17

II.32 EXPLOITATION DES RÉSULTATS :

Tableau N° 26 :

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Q débit (ml/mn) | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Capacité fractionnaire F % | 55 | 53 | 52 | 52 |
| Temps de percée tp (heure) | 4.25 | 3.40 | 2.50 | 2.09 |
| Temps de saturation ts (heure) | 5.58 | 5.00 | 4.02 | 3.22 |
| Volume traité correspondant au temps de percée , Vp (litre) | 3.97 | 4.40 | 4.25 | 3.87 |
| Volume traité correspondant au temps de saturation Vs (litre) | 5.37 | 6.00 | 6.05 | 6.06 |
| Hauteur de la ZTM HZ en cm | 1.62 | 1.68 | 1.91 | 2.40 |
| Vitesse de déplacement de la ZTM cm/h | 1.01 | 1.26 | 1.59 | 1.97 |
| Capacité d'adsorption en temps de percée Xp (mgF ⁻ /g d'AA) | 5.67 | 6.20 | 6.20 | 5.44 |

L'évolution des caractéristiques des courbes de percée sont représentées dans les figures N° 18-21

Evolution de la capacité fractionnaire en fonction du débit volumique

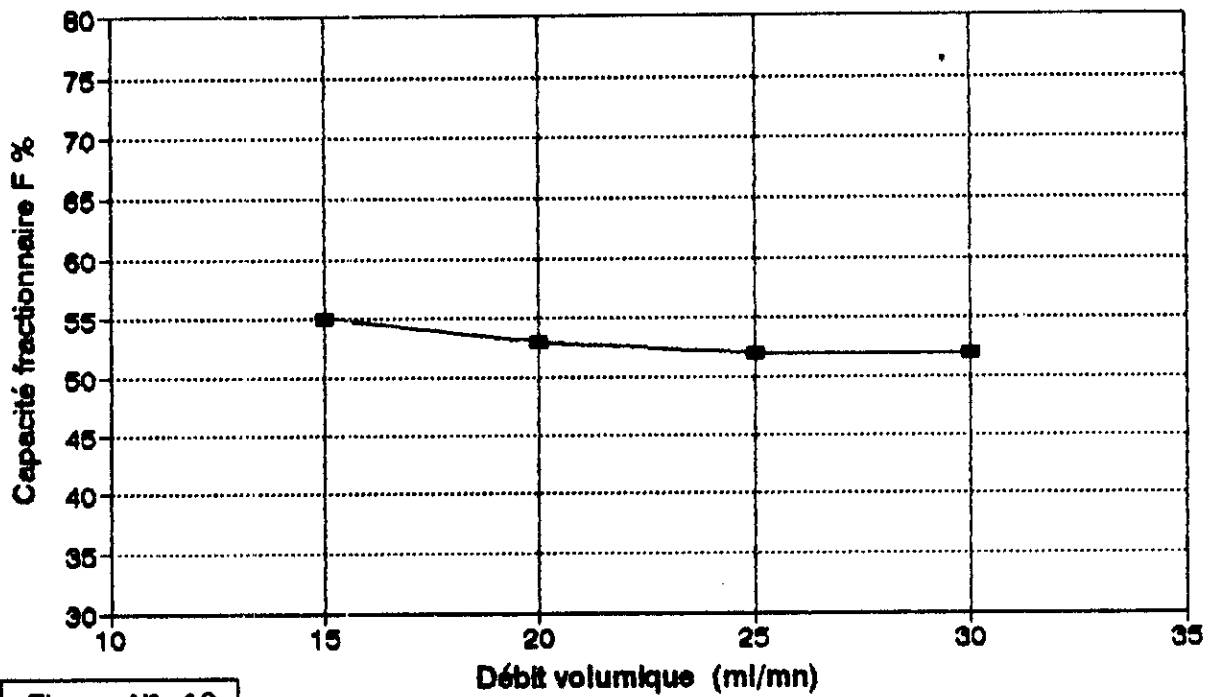


Figure N°: 18

Volumes traités au ts et tp en fonction du débit volumique

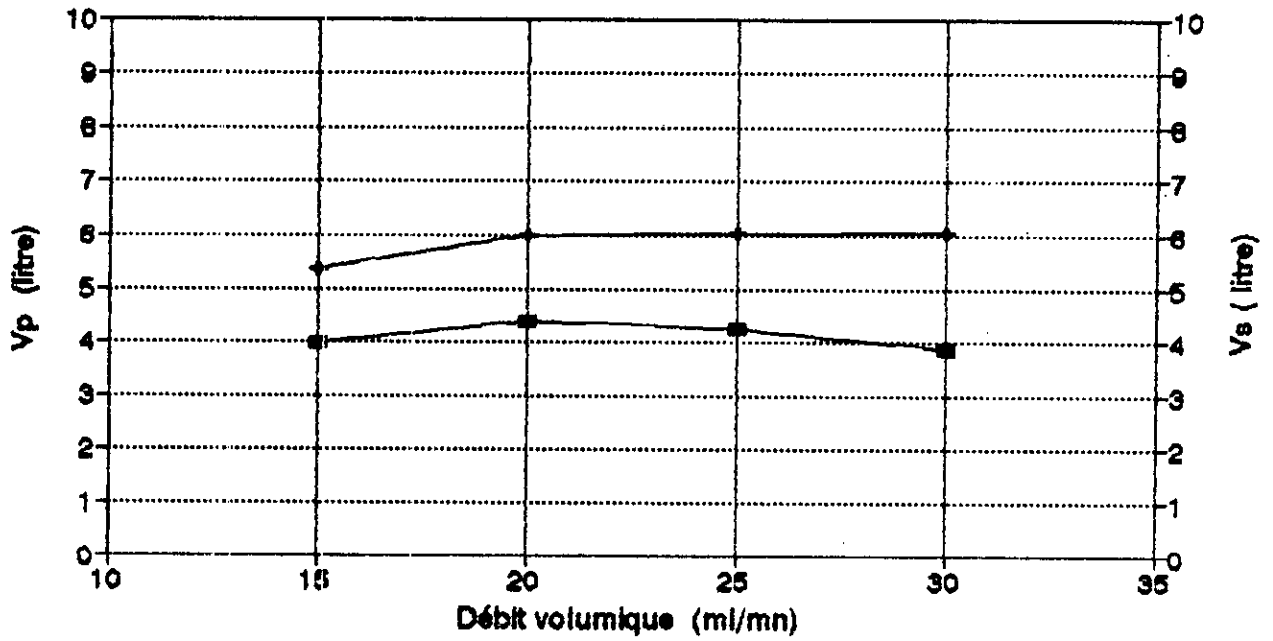


Figure N°: 19

—■— Vp —◆— Vs

Evolution de l hauteur de la ZTM (Hz) en fonction du débit volumique

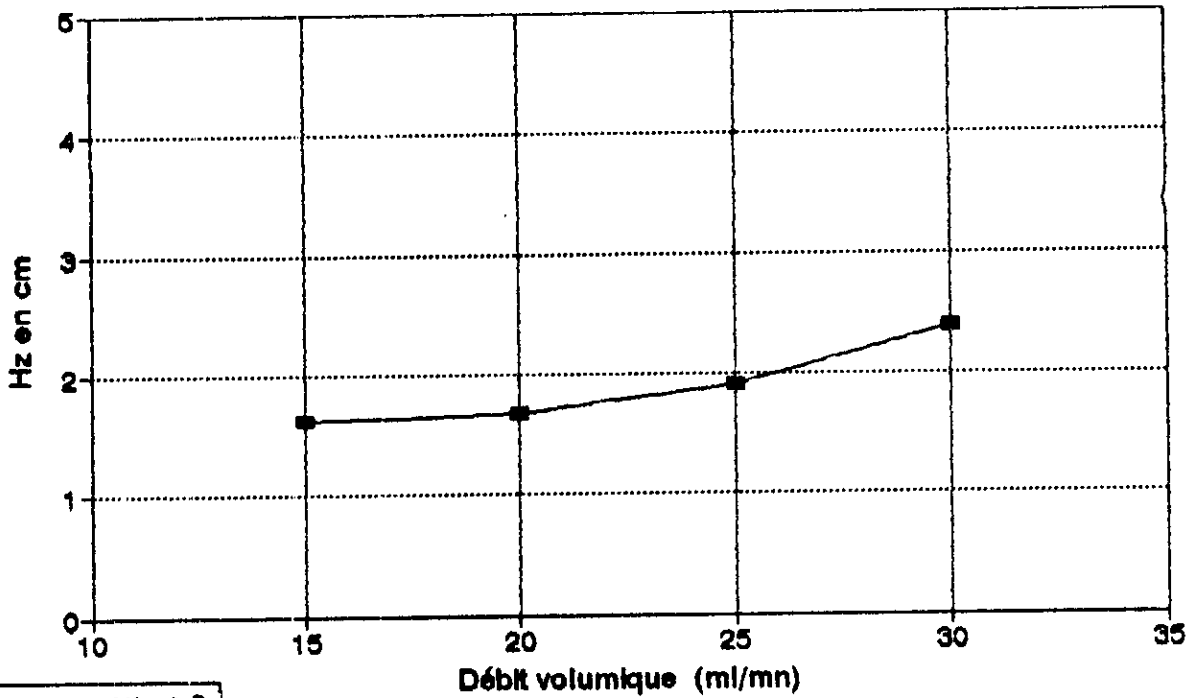


Figure N°: 20

Evolution de Uz en fonction du débit volumique

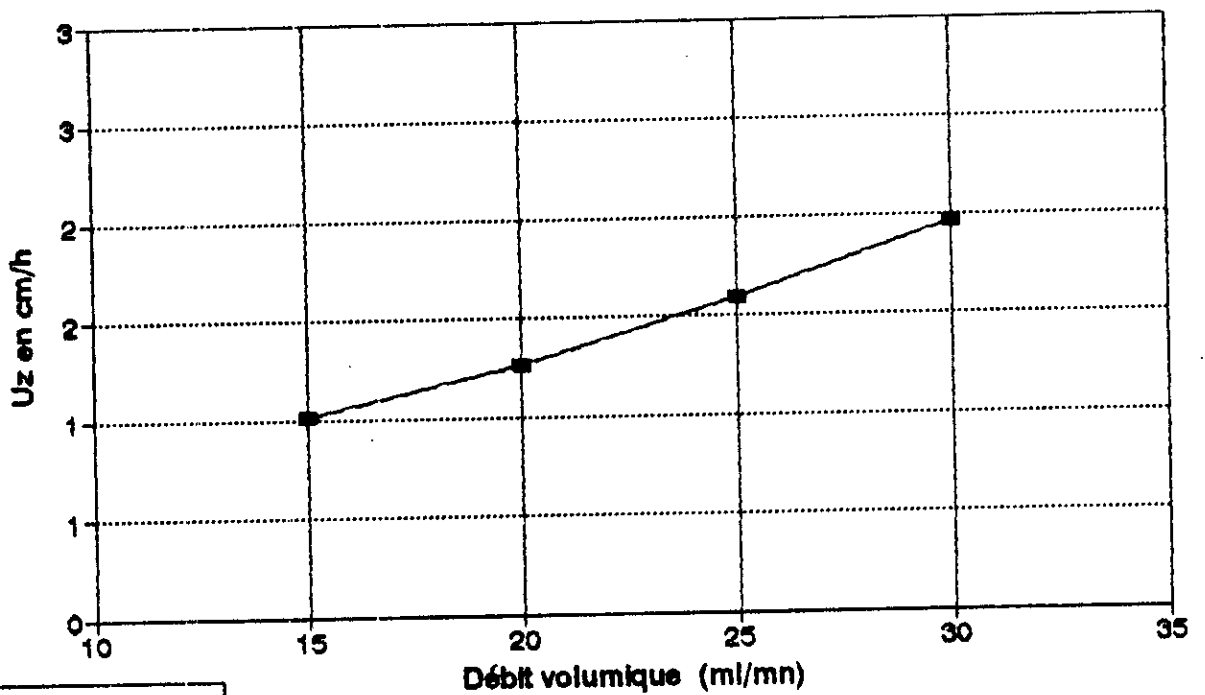


Figure N°: 21

Evolution de la capacité d'adsorption X_p en fonction du débit volumique

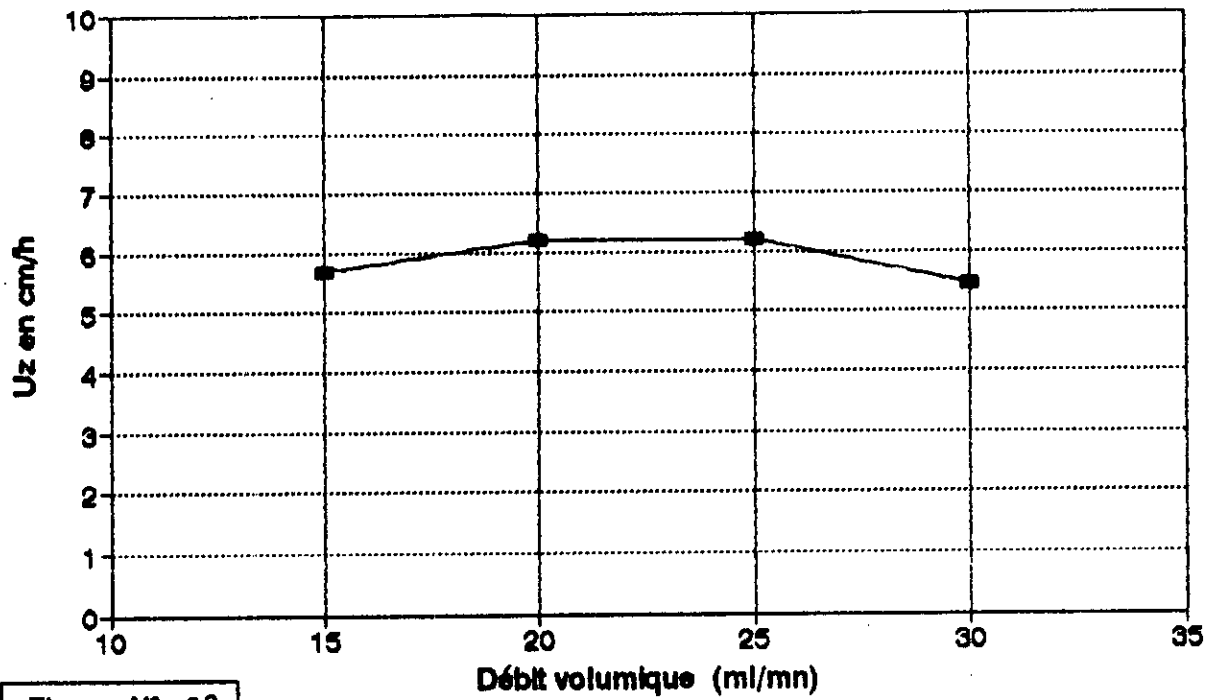


Figure N° : 22

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

II.3.3. INTERPRETATION DES RÉSULTATS :

a) Capacité fractionnaire F:

La capacité fractionnaire diminue légèrement avec le débit volumique on peut expliquer cela par le fait d'augmenter le débit ne permet pas l'établissement de la ZTM, mais elle reste toujours une caractéristique du système.

b) Volume de percée V_p :

Le volume de percée V_p diminue avec le débit volumique. L'augmentation du débit volumique entraîne une augmentation de la quantité de fluorures arrivant à la colonne et donc une adsorption rapide ce qui diminue le temps de percée et le volume de percée respectivement.

c) le volume de saturation V_s .

Le volume de saturation augmente jusqu'à une valeur limite. on explique cela de la manière suivante pour une hauteur de lit fixé et par conséquent une quantité d'alumine activée fixée, le nombre de sites disponibles est fixé donc la saturation est atteinte pratiquement pour une quantité de fluorure bien déterminée et comme pour une même concentration initiale le volume traité est proportionnel à la quantité traitée. On peut dire que le volume de saturation est indépendant du débit volumique.

d) Hauteur de la ZTM (Hz)

La hauteur de la ZTM (Hz) augmente avec le débit volumique surtout à partir du 25 ml/mn ; ceci est dû à l'encombrement stérique et aux conditions hydrodynamiques.

e) vitesse de déplacement de la ZTM (U_d)

La vitesse de déplacement de la ZTM (U_d) augmente avec le débit volumique à cause de l'augmentation de la quantité de fluorures adsorbées à l'intérieur de la ZTM et à l'encombrement

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

stérique.

D) Capacité d'adsorption au temps de percée X_p

La capacité d'adsorption au temps de percée X_p diminue avec le débit volumique. L'augmentation de débit fait augmenter la hauteur de la ZTM et vitesse de déplacement ce qui fait diminuer la quantité de fluorures éliminées par gramme d'alumine activée.

II.4 ETUDE DE L'INFLUENCE DU TAC

L'alcalinité de l'eau est un paramètre très important dans le traitement des eaux. Pour voir l'influence de ce paramètre on fait charger l'eau à traiter en plus des fluorures de sodium NaF par le bicarbonate de sodium $\text{Na}(\text{HCO}_3)$ afin d'avoir l'alcalinité désirable pour chaque expérience.

II.4.1 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tableau N° 27 :

a) TAC = 0 mg/l de CaCO_3 ,

| | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 50 | 100 | 150 | 180 | 220 | 230 |
| $[\text{F}^-]_{\text{sortie}}$ mg/l | 0.09 | 0.11 | 0.15 | 0.45 | 1.61 | 2.39 |
| Temps mn | 250 | 270 | 290 | 310 | 350 | 430 |
| $[\text{F}^-]_{\text{sortie}}$ mg/l | 4.55 | 6.58 | 7.56 | 7.92 | 8.29 | 8.65 |

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau N° 28 :

b) TAC = 100 mg/l de CaCO₃

| | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 35 | 60 | 90 | 120 | 145 | 160 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.45 | 0.80 | 1.00 | 1.99 | 5.87 | 6.44 |
| Temps mn | 180 | 190 | 210 | 240 | 270 | 400 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 6.97 | 7.56 | 7.56 | 7.65 | 8.01 | 8.11 |

Tableau N° 29 :

c) TAC = 150 mg/l de CaCO₃

| | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 25 | 45 | 65 | 85 | 100 | 110 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.22 | 0.22 | 0.32 | 1.45 | 3.22 | 3.97 |
| Temps mn | 130 | 160 | 180 | 210 | 240 | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 5.35 | 7.06 | 7.56 | 7.92 | 8.10 | |

Tableau N° 30 :

d) TAC = 250 mg/l de CaCO₃

| | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 30 | 55 | 70 | 90 | 110 | 130 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.16 | 0.38 | 2.03 | 3.79 | 5.61 | 6.88 |
| Temps mn | 160 | 200 | 240 | 310 | 350 | 430 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 7.83 | 8.29 | 8.58 | 7.92 | 8.29 | 8.65 |

Evolution de la concentration de sortie en fonction du TAC

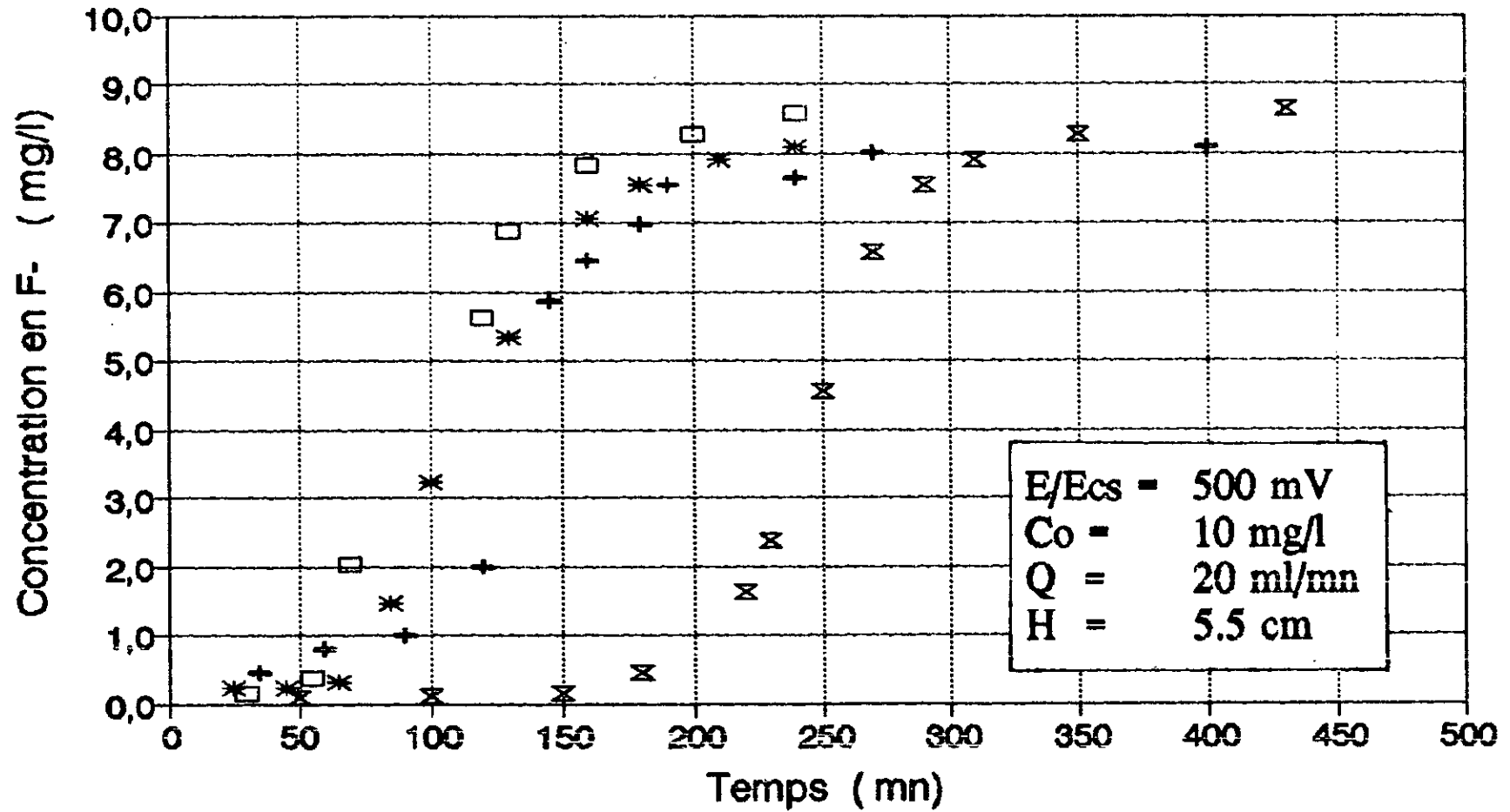


Figure N° 23

⊗ TAC = 0 mg/l + TAC = 100 mg/l * TAC = 150 mg/l □ TAC = 250 mg/l

II.4.2 EXPLOITATION DES RÉSULTATS :

Tableau N° 31 :

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| TAC mg/l de CaCO ₃ | 0 | 100 | 150 | 250 |
| Capacité fractionnaire F % | 53 | 51 | 51 | 50 |
| Temps de percée t _p (heure) | 3:40 | 1:42 | 1:24 | 1:03 |
| Temps de saturation t _s (heure) | 5:00 | 3:20 | 2:57 | 2:28 |
| Volume traité correspondant au temps de percée , V _p (litre) | 4.40 | 2.04 | 1.68 | 1.26 |
| Volume traité correspondant au temps de saturation V _s (litre) | 6 | 4 | 3.54 | 2.96 |
| Hauteur de la ZTM H _t en cm | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 |
| Hauteur de la ZTM H _s en cm | 1.68 | 3.54 | 3.89 | 4.43 |
| Vitesse de déplacement de la ZTM cm/h | 1.26 | 2.17 | 2.51 | 3.13 |
| Capacité d'adsorption en temps de percée X _p (mgF ⁻ /g d'AA) | 6.20 | 2.86 | 2.34 | 1.76 |

Les évolutions de ces caractéristiques sont représentées dans les figures 24-28.

II.4.3 DISCUSSIONS DES RÉSULTATS :

On remarque que toutes les caractéristiques des courbes de percée diminuent, lorsque le TAC de l'eau augmente.

Cela peut être expliqué par la compétition des ions bicarbonates (HCO⁻) avec les ions fluorures sur les sites d'adsorption de l'alumine activée.

On constate aussi sur les figures 24-28 que l'influence de ce paramètre est très marquée dans une zone de TAC allant de 0 à

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

150 mg/l de CaCO_3 au delà de cette valeur , elle devient pratiquement négligeable . ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par MAZOUNIE [14]

Evolution de la capacité fractionnaire en fonction du taux de TAC

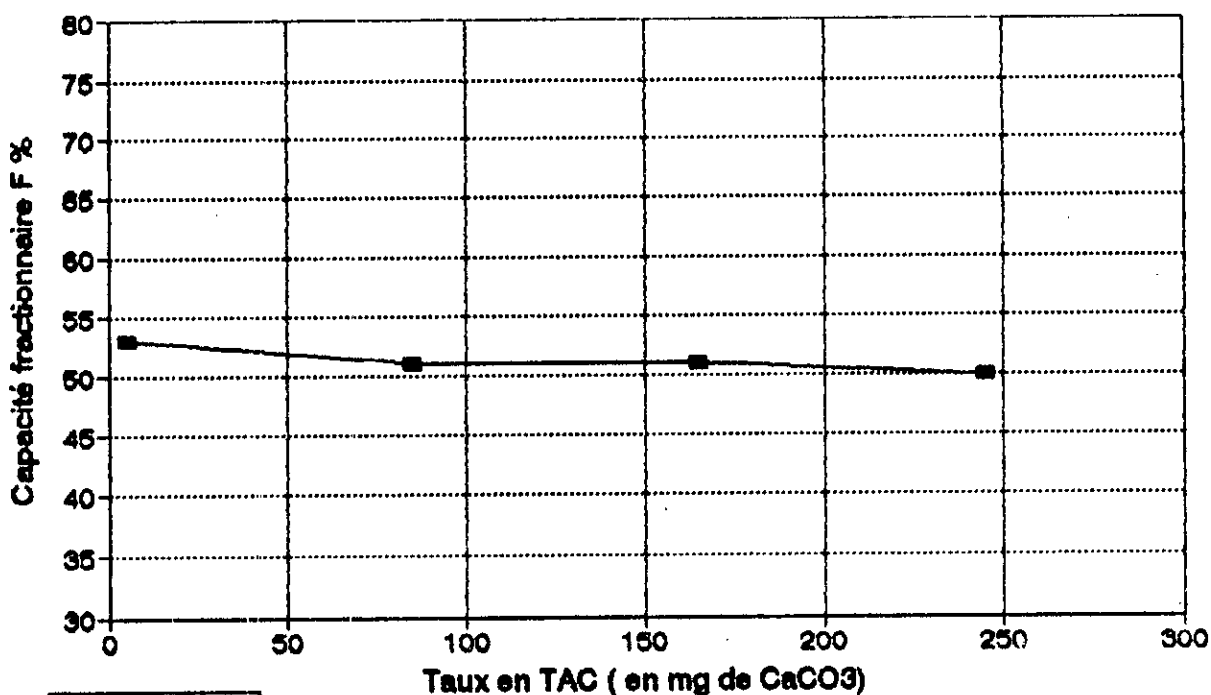


Figure N°: 24

Evolution des volumes traités Vp et Vs en fonction du taux de TAC

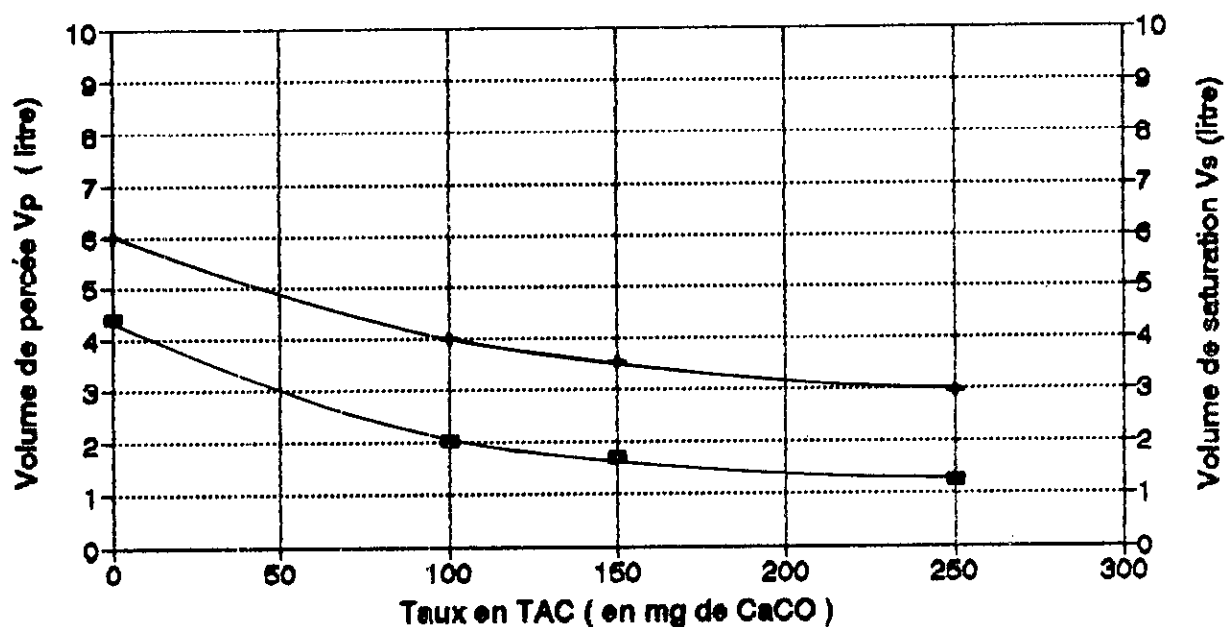


Figure N°: 25

■ Vp ● Vs

Evolution de la Hauteur de la ZTM en fonction du taux de TAC

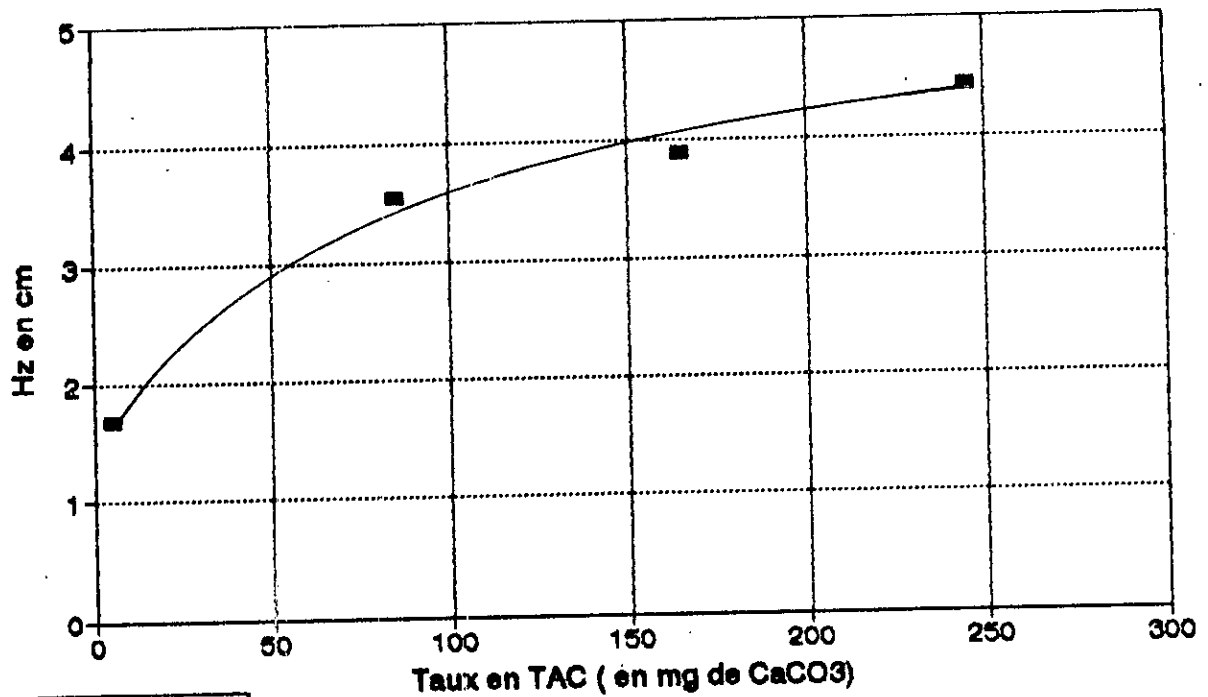


Figure N° : 26

Evolution de Uz en fonction du TAC

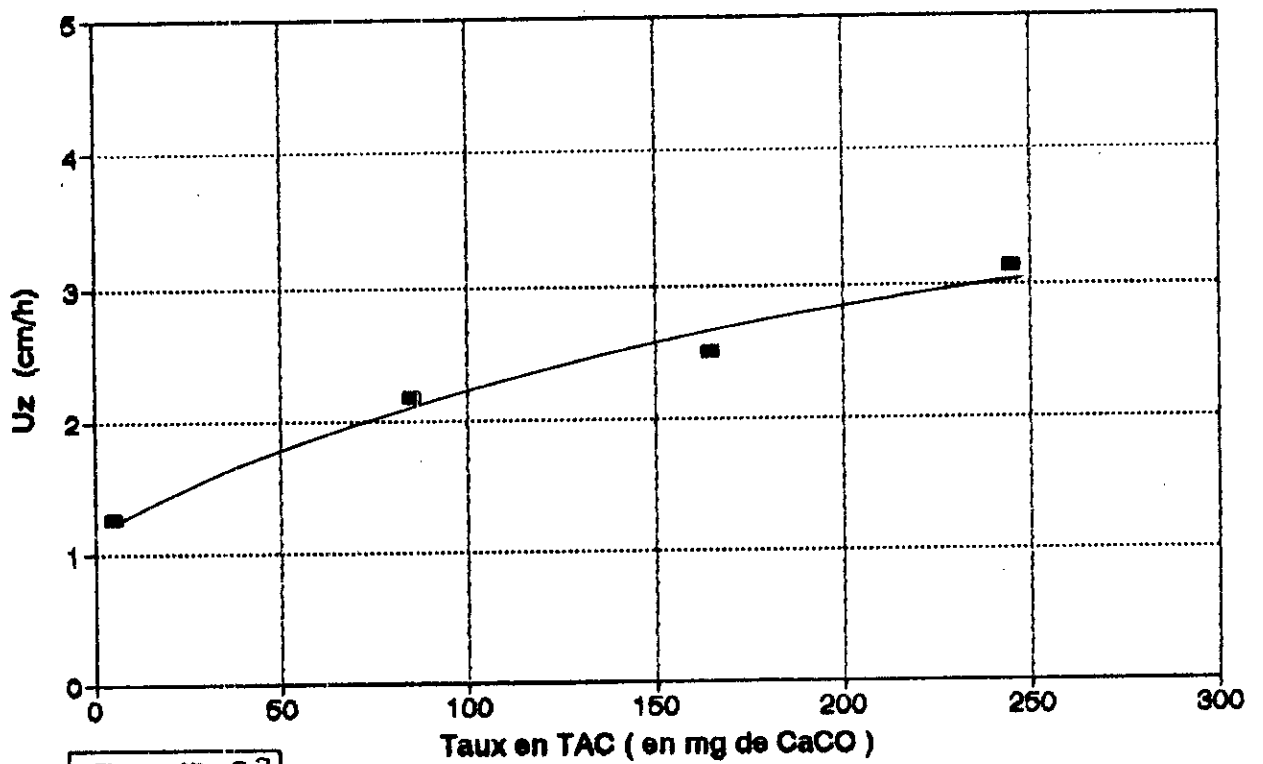


Figure N° : 27

Evolution de la capacité d'adsorption au ts en fonction du taux de TAC

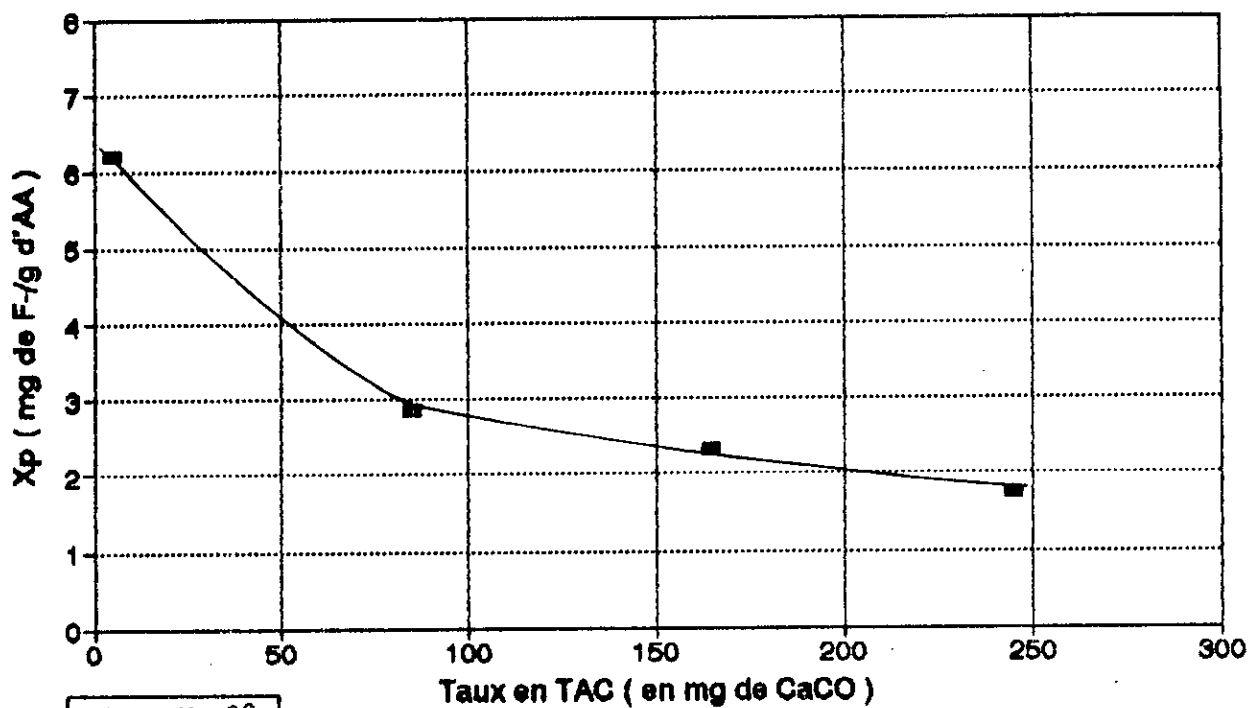


Figure N° : 28

II.5 EFFET DU CHAMP ÉLECTRIQUE SUR LA RÉGÉNÉRATION

II.5.1 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.

Pour voir l'effet du champ électrique sur la régénération de l'alumine activée. On opère de la façon suivante :

- Changer la polarité des électrodes:
- Faire varier la tension appliquée de 750 à 1200 mV
- Alimenter la colonne par un débit d'eau distillée de 15 ml/mn à co-courant:
- fixer la hauteur du lit à 13 cm.

Commencer la manipulation dès que la concentration des saturation du lit atteint 3 mg/l de F⁻.

L'analyse des échantillons a permis de dresser les tableaux suivants

a) Tableau N° 32 :

$E/E_{\infty} = -750 \text{ mV}$, $I = -123 \text{ mA}$

| | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|--------------|------|------|------|
| Temps mn | 20 | 40 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.25 | 1.31 | 1.37 | 1.441 .31 | 1.21 | 1.20 | |
| Temps mn | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 180 | 420 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.14 | 1.09 | 1.04 | 0.95 | 0.93 | 0.87 | 0.83 |

b Tableau N° 33 :

$E/E_{\infty} = -1000 \text{ mV}$, $I = -120 \text{ mA}$

| | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temps mn | 90 | 140 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 2.03 | 2.03 | 3.01 | 3.46 | 3.79 | 2.51 | 1.33 |
| Temps mn | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 540 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.09 | 0.86 | 0.72 | 0.66 | 0.39 | 0.33 | 0.28 |
| Temps mn | 600 | 660 | | | | | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.25 | 0.21 | | | | | |

c Tableau N° 34:
 $E/E_{0.} = - 1200 \text{ mV}$, $I = - 183 \text{ mA}$

| | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Temps: mn | 20 | 40 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.45 | 1.45 | 1.47 | 1.50 | 1.61 | 1.70 | 1.85 |
| Temps: mn | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 | 420 | |
| [F ₁ ⁻] sortie mg/l | 1.65 | 1.37 | 1.22 | 0.95 | 0.87 | 0.86 | |

L'évolution de la concentration de F⁻ libre en fonction du temps est donnée dans la figure N°29

Une expérience faite sans champ électrique permet de voir l'influence d'une façon plus claire.

c Tableau N° 35 :
 $E/E_{0.} = 00 \text{ mV}$,

| | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temps: mn | 40 | 60 | 80 | 120 | 150 | 180 | 230 |
| [F ⁻] sortie mg/l | 1.44 | 1.28 | 1.17 | 1.00 | 0.81 | 0.74 | 0.66 |
| Temps: mn | 260 | 300 | 360 | 420 | 480 | | |
| [F ⁻] sortie mg/l | 0.57 | 0.50 | 0.46 | 0.41 | 0.39 | | |

II.52 EXPLOITATION DES RÉSULTATS

La quantité de produits récupérée par gramme d'alumine activée est calculée graphiquement à partir de la relation

Evolution de la concentration du F libre en fonction du temps

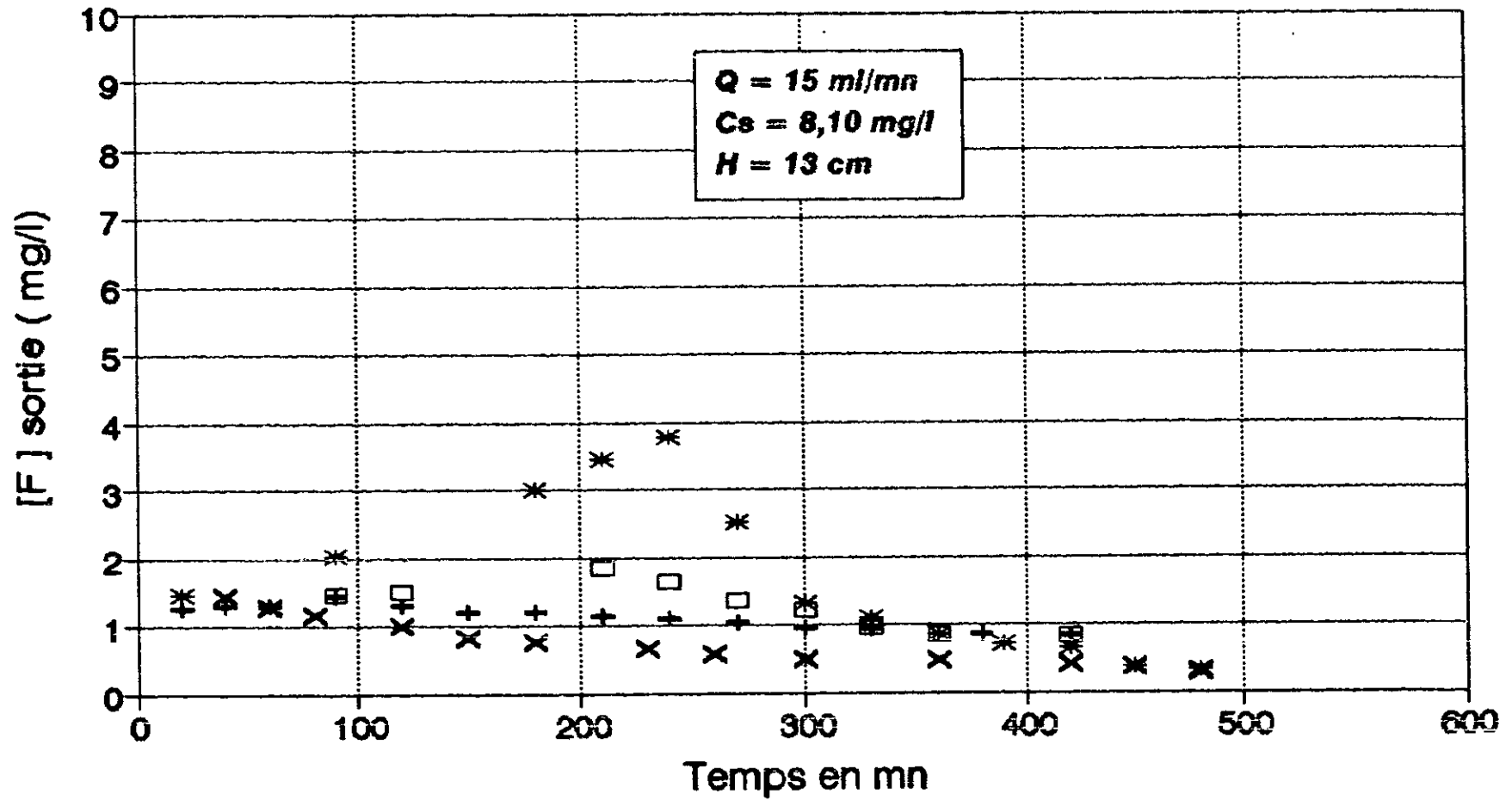


Figure N° : 29

X $E/E_{cs} = 0 \text{ mV}$ + $E/E_{cs} = -750 \text{ mV}$ * $E/E_{cs} = -1000 \text{ mV}$ □ $E/E_{cs} = -1200 \text{ mV}$

CHAPITRE DEUX : RESULTATS ET DISCUSSIONS

$$X_s = X_p + \frac{\int_{v_p}^{v_s} (C_o - C_i) dV}{m}$$

$$X_s = X_p + \frac{\int_{t_p}^{t_s} Q_j (\bar{C}_o - \bar{C}_i) dt}{m} \quad (15)$$

b) Rendement de régénération :

La performance de cette technique de régénération peut se faire en calculant le rendement de cette régénération par la relation suivante :

$$\%R = \frac{\text{Quantité éliminée par gramme d'AA}}{\text{Quantité récupérée après régénération par g d'AA}} \times 100$$

$$\%R = \frac{X_a(\text{adsorption})}{X_d(\text{désorption})} \times 100 \quad (14)$$

Résultats de ce calcul :

| E/Ecs (mV) | 00 | -750 | -1000 | -1200 |
|-------------|----|------|-------|-------|
| R % | 7 | 11 | 21 | 14 |

Interprétation des résultats :

En constatant le rendement de régénération , on peut avancer que la technique appliquée dans les conditions opératoires n' a pas donné les résultats escomptés . les valeurs obtenues restent très faibles comparativement aux autres modes citées dans la partie bibliographiques et aux celles obtenues par TOUATI. [12]

Mais il est toujours utile de refaire les expériences en changeant les conditions opératoires .

Chapitre Trois :

Etablissement du modèle mathématique

Les premières séries d'essais expérimentaux nous ont permis de déterminer et de choisir quels sont les paramètres les plus significatifs donc les plus utiles lors de la modélisation .

Nous aurions pu utiliser les résultats déjà obtenus lors de la partie expérimentale pour établir une corrélation entre les différents paramètres simplement par l'emploi de la méthode de régression linéaire. Mais seulement , elle présente l'inconvénient de ne pas tenir compte des éventuels interactions entre les paramètres ce qui souvent le cas dans le domaine des procédés unitaires.

Afin de pallier à ce désavantage, nous avons opté pour la méthode de planification factorielle 2^n . Cette dernière outre le fait qu'elle réduit considérablement le nombre d'expériences "nécessaires" à la modélisation , mais surtout elle tient compte des interactions entre les paramètres.

L'équation que nous allons chercher se limitera à trois variables dépendantes de sorte qu'on pourra l'écrire sous la forme de :

$$Y = f (X_1 , X_2 , X_3).$$

ou Y est la réponse de la fonction.

Les conditions expérimentales sont déterminées en choisissant deux niveaux pour chaque variable , un niveau inférieur et un niveau supérieur et en les combinant de toute les façons possibles , on effectue alors une série "planification" de 2^n .

III.1. LE CHOIX DES PARAMÈTRES

Nous avons opté pour les paramètres suivants :

Le volume de percée par unité de masse d'alumine activée est choisi comme paramètre dit "indépendant" ou "Réponse" , nous avons jugé qu'il constitue un bon indicateur d'efficacité de traitement et d'un bon outil de comparaison entre des opérations tenues souvent dans des conditions opératoires différentes .

Comme paramètres dépendants ou communément appelées "variables" , nous avons choisi, pour

- l'effet du champ électrique du fait qu'il constitue l'originalité même de ce présent travail.
- La hauteur du lit : pour sa grande influence sur l'efficacité du traitement , et sa maniabilité opératoire
- Et enfin, le débit de l'eau à traiter , un paramètre incontournable dans le domaine du "design" pour sa maniabilité ; il constitue , souvent le premier facteur que l'ingénieur agisse dessus pour contrôler son installation.

Remarque : D'autres paramètres auraient pu être choisis tel , le pH, l'alcalinité , mais nous sommes contents de ne prendre que les plus significatifs et aussi du fait du temps requis .

En effet , l'intervalle du pH à optimiser est réduit , de sorte qu'à l'échelle industrielle , il serait assez difficile d'intervenir de manière pratique sur ce paramètre .

Quant à l'alcalinité , le paramètre n'a pas été choisi du fait qu'il s'agit plus d'un paramètre imposé , inhérent à la qualité de l'eau à traiter qu'un paramètre "régulable".

III.2. CHOIX DE LA PLANIFICATION ET PROGRAMMATION DES EXPERIENCES

Nous avons utilisé le modèle le plus simple et le plus rapide à mettre en oeuvre qui nécessite le moins d'expériences, autrement dit le modèle cubique à simple faces, il nécessite 2³ soit huit expériences à réaliser

III.3 CHOIX DES NIVEAUX

Les valeurs minimales prises pour les trois paramètres sont ceux utilisées dans la partie expérimentale soit :

| | | |
|--------------------------|------------------|----------|
| <u>Champs électrique</u> | Niveau inférieur | 250 mV |
| | Niveau supérieur | 1000 mV |
| <u>Hauteur du lit</u> | Niveau inférieur | 3,5 cm |
| | Niveau supérieur | 8 cm |
| <u>Débit</u> | Niveau inférieur | 15 ml/mn |
| | Niveau supérieur | 30 ml/mn |

De sorte que le tableau des expériences à mettre en oeuvre est établi comme suit :

Tableau N°III.1 : Plan d'expériences à réaliser

| N° | Valeurs réduites | | | Valeurs correspondantes | | |
|----|------------------|----|-------|-------------------------|---------|----------------|
| | E/Ecs | H | Débit | E/Ecs mV | H cm | Débit ml/mn |
| 1 | -1 | -1 | +1 | 250 | 3.5 | 30 |
| 2 | +1 | +1 | -1 | 1000 | 8 | 15 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 250 | 8 | 15 |
| 4 | +1 | -1 | +1 | 250 | 8 | 30 |
| 5 | -1 | +1 | +1 | 250 | 8 | 30 |
| 6 | +1 | -1 | -1 | 1000 | 3.5 | 15 |
| 7 | +1 | +1 | +1 | 1000 | 8 | 30 |
| 8 | +1 | -1 | -1 | 1000 | 3.5 | 15 |

III.4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Nous avons procédé aux expérimentations recommandées par le plan factoriel aux coordonnées indiquées et les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau suivant N° III.2 :

Tableau N° III.2 : Les résultats d'expériences de planification

| N° d'expérience | Y : Réponse (e = 1/g d'AA) |
|-----------------|--------------------------------|
| 1 | 2.25 |
| 2 | 2.65 |
| 3 | 2.10 |
| 4 | 2.61 |
| 5 | 3.39 |
| 6 | 3.93 |
| 7 | 2.82 |
| 8 | 3.60 |

III.4.1 ETUDE DE LA FORME SIMPLIFIÉE SANS INTERACTIONS

On rappelle que X_i est la variable en coordonnées réduites. L'utilisation de ces dernières facilite énormément les calculs; les équations intermédiaires obtenues se réduisent en équations du premier degré faciles à résoudre.

Au fait on s'intéressera au premier lieu qu'aux effets des trois variables X_1 , X_2 , X_3

Une telle écriture conduira à une équation de type

$$e = K + A E + B H + C Q$$

Avec e: Le volume de percée par unité de masse d'alumine activée l/g

H: Hauteur du lit en cm

E: Valeur du champs électrique en mV

Q: Débit de l'eau à traiter en ml/mn

Les coefficients K , A , C , B sont déterminés par la méthodes des moindres carrés à plusieurs variables

Et la résolution des équations nous a donné comme résultat ce qui suit :

| | |
|-------------|-------------|
| constante K | = 0.560972 |
| A:E | = 0.000103 |
| B:Hauteur | = -0.030556 |
| C:Debit | = -0.002167 |

d'ou l'équation du modèle recherchée :

$$e = 0.560972 + 0.00103 E - 0.0730556 H - 0.02167 Q$$

On remarque de prime d'abord, des différentes valeurs des coefficients, la très forte prépondérance de la hauteur du lit sur l'efficacité du traitement devant les autres paramètres. Mais , pour étudier la validité du modèle obtenu , il faut construire la table d'analyse de la variance ANOVA du modèle proposé précédemment. L'analyse statistique permet de tirer des conclusions sur l'importance effective de chacune des variables sur la grandeur Y et par conséquent sur le volume de percée par unité de masse d'alumine activée .

Chapitre III

Etablissement du modèle mathématique

Tableau III.3 Table d'ANOVA pour l'étude de trois facteurs sans INTERACTIONS

| Effet | Somme des Carrées | Degré de liberté | Moyenne au carré | F-Ratio | P-value |
|---------------|-------------------|------------------|------------------|---------|---------|
| A: B | 0.01201250 | 1 | 0.0120125 | 7.19 | 0.0437 |
| B: Hauteur | 0.03781250 | 1 | 0.0378125 | 22.64 | 0.0051 |
| C: Débit | 0.00211250 | 1 | 0.0021125 | 1.26 | 0.3118 |
| Total erreur | 0.00835139 | 5 | 0.0016703 | | |
| Total (corr.) | 0.06028889 | 8 | | | |

R-au carré = 0.861477

R au carré ajusté = 0.778363

La valeur du coefficient de corrélation obtenue 0.783 est intéressante mais pas suffisante ce qui indique la nécessité d'introduire des termes supplémentaires mettant en évidence les interactions entre les différentes variables .

III.42 ETUDE DE LA FORME SIMPLIFIÉE AVEC INTERACTIONS

Comme cité ci-dessus , on s'intéresser en plus des effets des trois variables à l'effet de leur INTERACTIONS soit le modèle sera de la forme

$$e = K + A E + B H + C Q + AB EH + AC EQ + BC HQ$$

Avec e: Le volume de percée par unité de masse d'alumine activée

H: Hauteur du lit en cm

E: Valeur du champs électrique en mV

Q: Débit de l'eau à traiter en ml/mn

Les coefficients K , A , C , B , AB, AC , BC sont déterminés par la méthodes des moindres carrés à plusieurs variables

Après la résolution de systèmes d'équations , les valeurs obtenues sont comme suit :

| | |
|-------------|----------------|
| Constante K | 0.527824 |
| A:Champ_E | 0.000096 |
| B:Hauteur | - 0.017593 |
| C:Debit | - 0.001426 |
| AB | - 7.407407 E-6 |
| AC | 2.222222 E-6 |
| BC | - 0.00037 |

Tableau N°III.4 Table d'ANOVA pour le modèle avec interactions

| Effet | Son. des carrés | DL | Moy. Carrée | F-Ratio | P-value |
|---------------|-----------------|----|-------------|---------|---------|
| A:Champ_E | 0.01201250 | 1 | 0.0120125 | 961.00 | 0.0203 |
| B:Hauteur | 0.03781250 | 1 | 0.0378125 | 3025.00 | 0.0114 |
| C:Debit | 0.00211250 | 1 | 0.0021125 | 169.00 | 0.0482 |
| AB | 0.00031250 | 1 | 0.0003125 | 25.00 | 0.1240 |
| AC | 0.00031250 | 1 | 0.0003125 | 25.00 | 0.1240 |
| BC | 0.00031250 | 1 | 0.0003125 | 25.00 | 0.1240 |
| Total erreur | 0.00001250 | 1 | 0.0000125 | | |
| Total (corr.) | 0.05266750 | 7 | | | |

R-carré = 0.999764

R-carré (adj. pour DL.) = 0.998346

La table ANOVA donne un très bon sinon excellent coefficient de corrélation de 0.998 ce qui indique la très bonne corrélation entre les variables et la réponse et surtout ce qui indique l'importance des INTERACTIONS.

Donc le modèle est validé et est de la forme suivante :

$$e = 0.527824 + 0.000096 E - 0.017593 H - 0.001426 Q - 7.407 \cdot 10^{-6} E H + 2.222 \cdot 10^{-6} E Q - 0.00037 H Q$$

Chapitre III Etablissement du modèle mathématique

avec le domaine de validité du modèle :

$$250 \text{ mV} < E/Ecs < 1000 \text{ mV}$$

$$3 \text{ cm} < H < 8 \text{ cm}$$

$$15 \text{ ml/mn} < Q < 30 \text{ ml/mn}$$

et ce qu'il fallait déterminer .

Et nous finirons cette étude par présenter un graphe 'voir figure N° 30 : signalant l'excellente corrélation entre les valeurs prévues par le modèle établi et la valeurs observées .

Nous présentons également quelques digrammes^a (Figures N° (31-32-33-34) établies à partir du modèle illustrant quelques possibilités offertes par la modélisation , et les diverses facilités offertes.

Nous terminons par l'indication que nous nous sommes servis du Logiciel de START GRAPHICS PLUS™ pour les divers calculs élaborés dans ce chapitre , qui en demeurant constitue un très bon outil de travail.

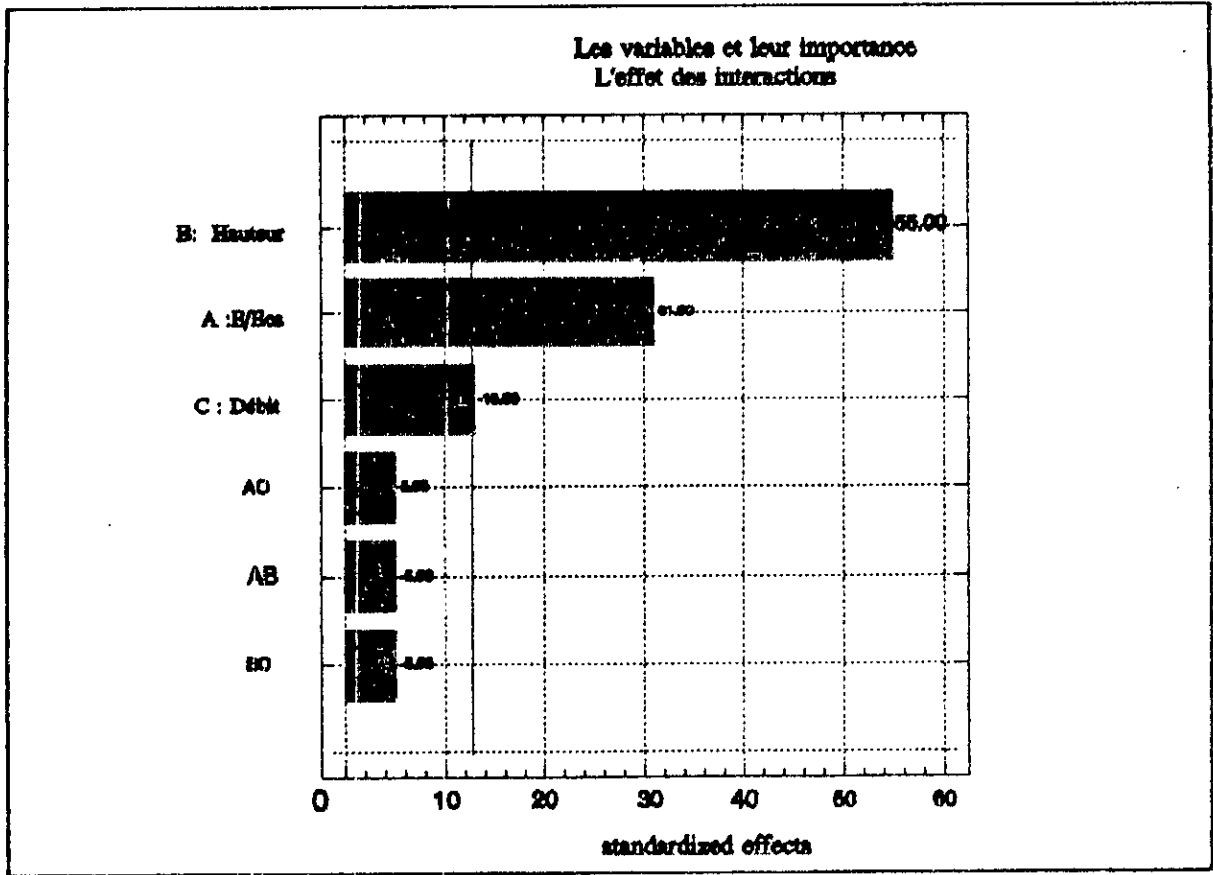
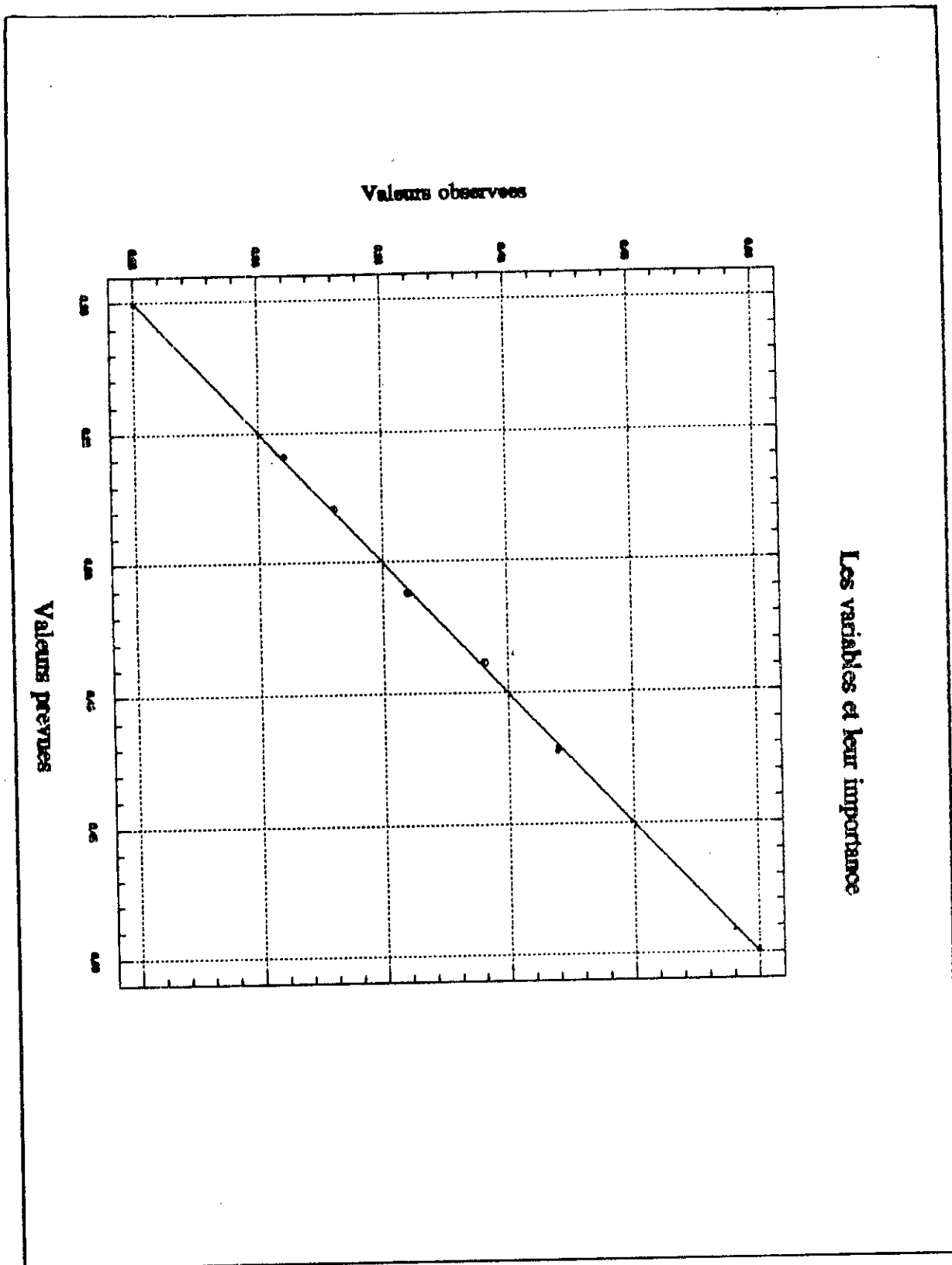


Figure N° 30

Digramme représentant l'importance relative de chaque variable et les interférences

Figure N° 31

Corrélation entre les valeurs prévues par le modèle et les valeurs expérimentales (observées)



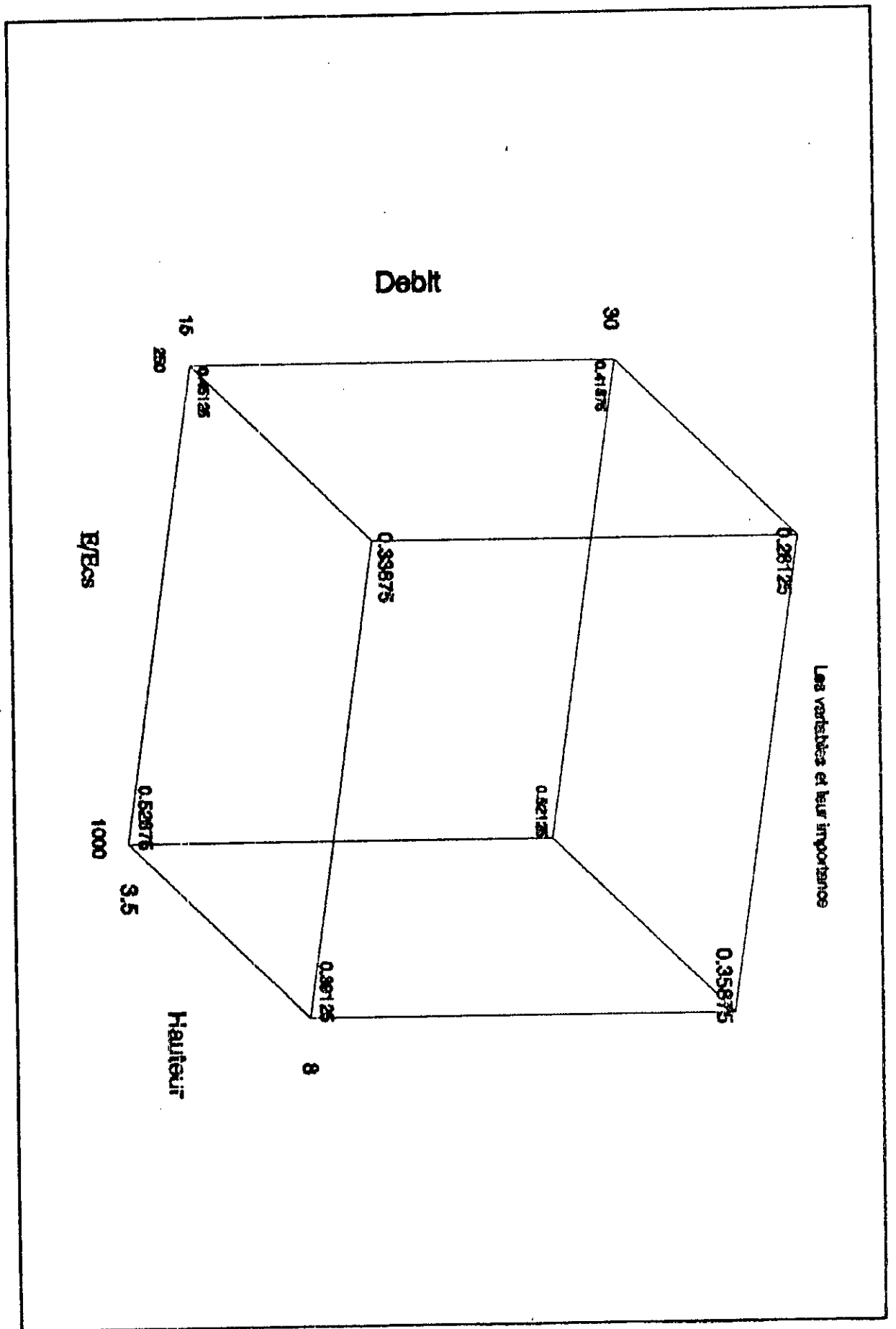


Figure N° 32

Diagramme du plan factoriel

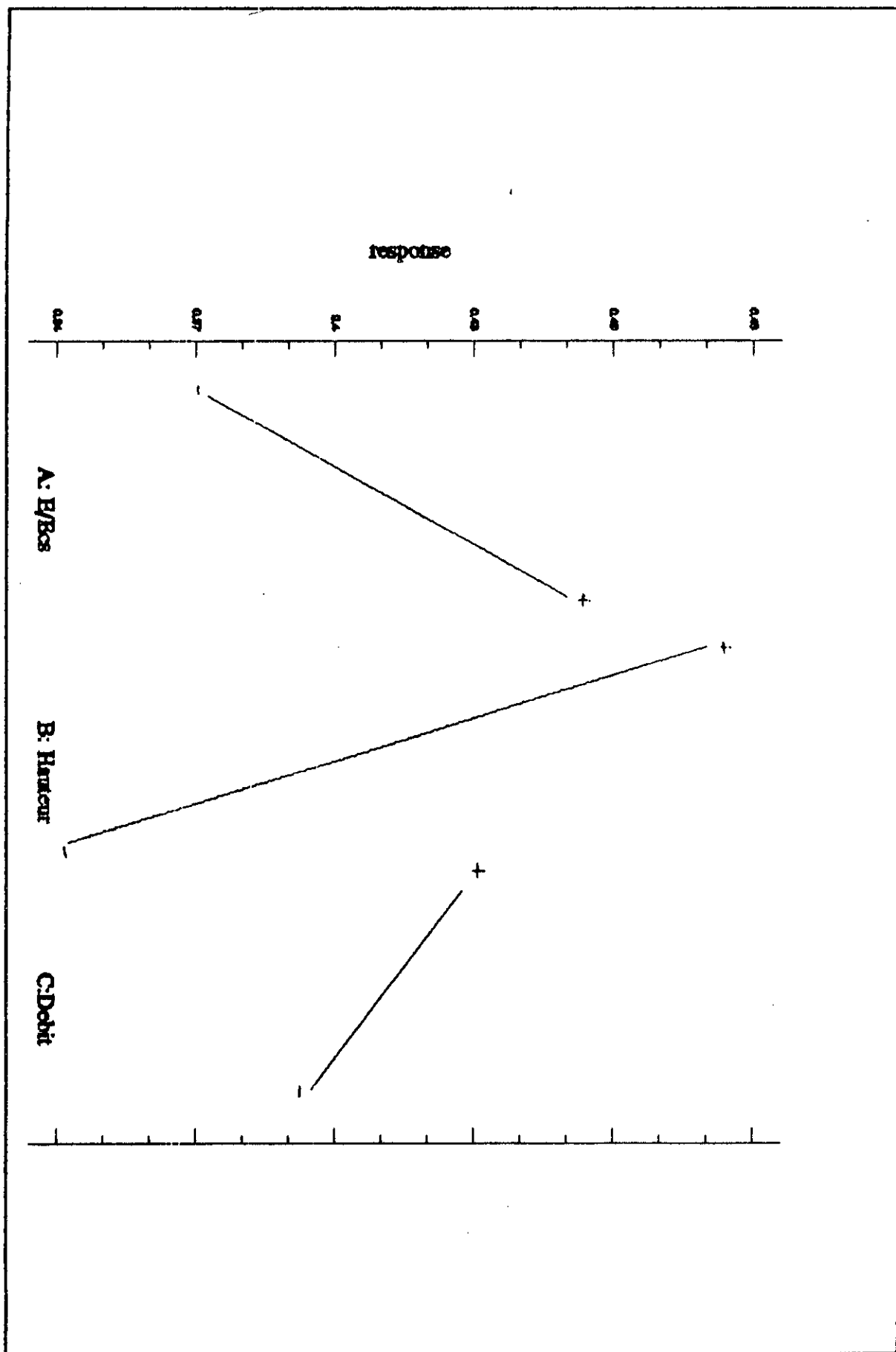


Figure N° 33

Hiogramme représentant la réponse en fonction des variables

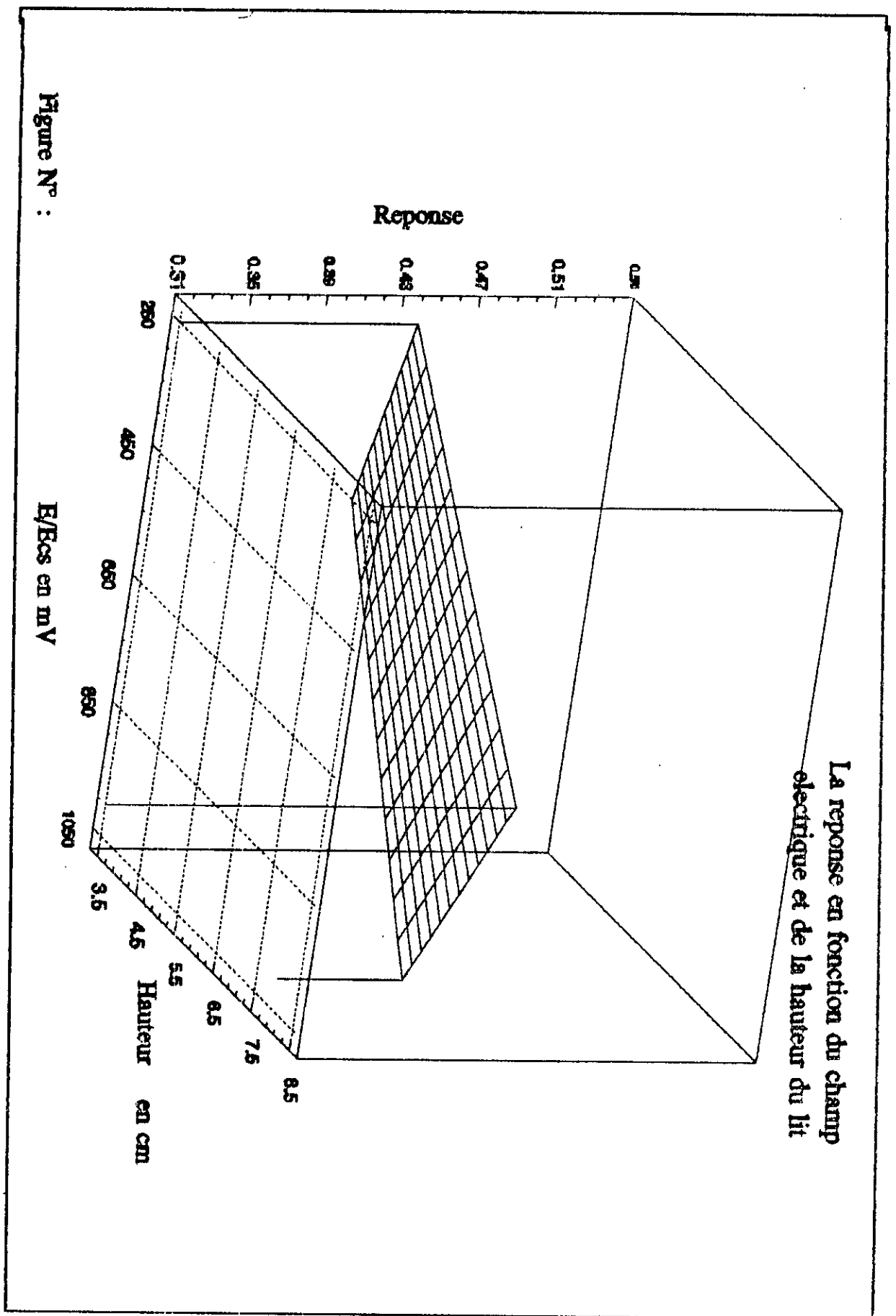


Figure N° :

Figure N° 34

Digramme Volume de percée (Reponse) en fonction du champ electrique exercé et de la hauteur du lit

Conclusion

Les résultats d'essais obtenus en laboratoire montrent que l'utilisation du champ électrique conjointement avec l'adsorption sur l'alumine activée se prête bien à l'amélioration de la capacité d'élimination des fluorures. On observe des gains de 35 - 47% pour le volume de percée, des valeurs très prometteuses quant à l'efficacité et la poursuite des travaux sur l'electroadsorption.

En outre, des études sur l'influence de la hauteur du lit, du débit volumique sur l'efficacité de l'adsorption ont été menées. Ces variables ont été choisies du fait qu'ils constituent les variables "régulables" que l'ingénieur peut asservir.

Une étude sur l'influence du IAC sur l'efficacité de l'adsorption sur l'alumine activée montre qu'il est un paramètre non négligeable, qu'il faudra tenir en compte même s'il constitue un facteur plutôt imposé qu'asserviable.

Quant à l'influence du champ électrique sur la régénération, les résultats sont peu concluants, mais par contre nous recommandons de persévérer dans cette voie, en changeant les conditions opératoires par exemple.

Nous avons trouvé l'équation du modèle, à l'aide du plan factoriel, représentant le volume de percée en fonction de champ électrique E , de la hauteur du lit H , et du débit volumique Q avec un bon coefficient de corrélation $R^2 = 0.998$:

$$\theta = 0.527824 + 0.00096 E - 0.017593 H - 0.001426 Q \\ - 7.407 \cdot 10^{-6} EH + 2.22 \cdot 10^{-6} EQ - 0.00037HQ$$

Bibliographie :

- 1 **RUBEL.F AND DELAWOOSLEY** " The removal of excess fluoride from drinking water by activated Alumina"
- 2 **DERHAUCOURT J.C** " La défluoruration des eaux potables " Techniques et Sciences Municipales N° 3/1980
- 3 **SAVINELLI E. and BLACK R** " defluoridation of water with activated alumina"
- 4 **BISHOP P; SANCOUCY .G** : " Fluoride removal from drinking water by fluidized activated alumina "
- 5 **KETTAB K** " Traitement des eaux" OPU ,Alger 1993.
- 6 **WON WOOK C. CHEN K.Y.** "The removal of fluoride from waters by adsorption"
- 7 **DESJARDINS R.** " Le traitement des eaux " Edition Lavoisier 1988.
- 8 **DEGREMENT** " Memento technique de l'eau " 2 volumes , Edition Lavoisier , 1989
- 9 **JERSALE . C. BELLE J.P** "Elimination des fluorures par adsorption échange sur alumine activée. . TSM N° 2/1984
- 10 **SADAT .T** " Défluoruration des eaux du sud algérien par électrolyse..." Projet de Fin d'Etudes , ENP , 1992
- 11 **NAMANE . A.** " Contribution à l'étude de l'adsorption dynamique du système phénol charbon actif " Thèse de magister , ENP 1991
- 12 **TOUATI M ."** Défluoruration des eaux potables par adsorption sur alumine activée " Projet de fin d'études , ENP 1993
- 13 **OLIVER .J et Col** "Adsorption characteristics of fluoride onto hydrous alumina
- 14 **BARBIER J.B. MAZOUNIE P.** " Méthode d'élimination des fluorures " année 1984
- 16 **MAZOUNIE P et MOUCHET P.** "procédes d'elimination du fluor dans les eaux alimentaires " Revue française des sciences de l'eau pp 29-51 3/1984
- 17 **RUMEAU M** " Le traitement électrochimique des eaux et des effluents" pp 45-55 Tribune du CEBEDEAU N° 3 1989

- 18 ACHOUR . S " La qualité des eaux du sahara septentrional en Algérie " Tribune de l'eau " Mars 1990
- 19 BESSON J " Manipulation délectrochimie " Ed Masson , 1972
- 20 BULUSU K.R. NAWLAKHE N. " Defluoridation of water with activated alumina : batch opérations . Indian J.Env 1988
- 21 BULUSU K.R. NAWLAKHE N. " Defluoridation of water with activated alumina "continuous contacting system" J . Indian J.Env 1990
- 22 OMS "La technologie appropriée de déminéralisation de l'eau potable " Alger 11/81
- 23 CHOVIN P ROUSSEL A " Physicochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques " Ed Masson 1973
- 24 BARNEA M." Pollution et protection de l'atmosphère " Edition Eyrolles 74
- 25 JINADASA K.P. et Col " A rapid method for the defluoridation of fluoride rich drinking waters at village level " 1987
- 26 CHATURVEDI A. et Col " Defluoridation of water by adsorption on fly ash "1989
- 27 LAGAUE A. " Defluoruration des eaux souterraines au Sénégal " TSM , 1988
- 28 GONELLA C. " Le traitement des eaux publiques industrielles et privées " Ed Eyrolles , 1978.
- 29 MAMERI N , MAZIGHI A. , BARIOU B, MARCHAND A;
"Défluoruration des eaux du sud algérien " Communication EPEAU 1992
- 30 AIRAZION IENkov Mechlkine. " Element de modélisation et traitement préliminaire Ed MIR 1985
- 31 DEUA P GIRAULT M. " Analuse de la variance et plans d'expériences Ed Wiley Intersciences , 1978
- 32 FRANCKS. " Modeling and simulation Engineering " Ed Wiley Intersciences 1972

Liste des principaux symboles utilisés

| | |
|--------------------|---|
| AA : | Alumine activée |
| C : | Concentration instantannée de l'effluent mg/l |
| C ₀ : | Concentration de l'influent mg/l |
| C _s : | Concentration de saturation en mg/l |
| F : | Capacité fractionnaire en % |
| H : | Hauteur du lit en cm |
| H _z : | Hauteur de la zone de transfert de matière en cm |
| [F] : | Concentration en ions fluorures en mg/l |
| Q : | Débit volumique en ml/mn |
| U _z : | Vitesse de déplacement de la ZTM en cm/m |
| I : | Intensité de courant A |
| E/Ecs , E : | Tension appliquée par rapport à l'électrode de référence en mV. |
| TAC : | Titre alcalimétrique complet |
| U = | Energie consommée en KW/h M3 |
| R : | Rendement de régénération % |
| X _p : | Capacité d'adsorption au temps de percée |
| X _s : | Quantité des fluorures récupérée par gramme d'alumine activée en mg/g |
| V _s : | Volume de l'effluent collecté au point de saturation litre |
| V _{p,e} : | Volume de l'effluent collecté au point de percée litre |