

—oo0oo—

Ministère de l'Education Nationale

—oo0oo—

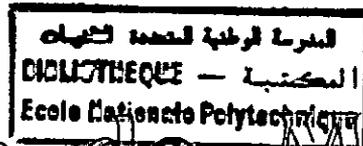
Secrétariat d'Etat à l'Enseignement Supérieur

—oo0oo—

Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

—oo0oo—



Thèse de Magister

Présentée par :

Mlle **AROUA S.**

Ingénieur en GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Diplômée de l'E.N.P.

**ETUDE DE LA COAGULATION -
FLOCCULATION PAR DE
NOUVEAUX COAGULANTS
SUR LES EAUX DE SURFACE**

SOUTENU PUBLIQUEMENT EN SEPTEMBRE 1993 DEVANT LE JURY :

Président	Mr R. KERBACHI	Professeur	(ENP)
Rapporteur	Mr A. KETTAB	Maître de conférences	(ENP)
Examineurs	Mr M. NAKIB	Chargé de cours	(ENP)
	Mr B. MAOUCHE	Professeur	(USTHB)
	Mlle F. HADDOUM	Doct. Ing.	(ENP)
INVITES	Mr A. NAAMANE	Chargé de cours	(ENP)
	Mr F. OUERDANE	Direct. st. de traitement	(EPEAL)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

—oo0oo—

Ministère de l'Education Nationale

—oo0oo—

Secrétariat d'Etat à l'Enseignement Supérieur

—oo0oo—

Ecole Nationale Polytechnique

Département : GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

—oo0oo—

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Magister

Présentée par :

Mlle **AROUA S.**

ingénieur en GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Diplômée de l'E.N.P.

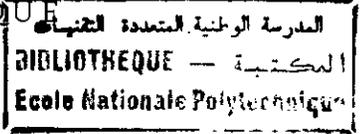
ETUDE DE LA COAGULATION-
FLOCCULATION PAR DE
NOUVEAUX COAGULANTS
SUR LES EAUX DE SURFACE

SOUTENU PUBLIQUEMENT EN SEPTEMBRE 1993 DEVANT LE JURY :

Président	Mr R. KERBACHI	Professeur	(ENP)
Rapporteur	Mr A. KETTAB	Maître de conférences	(ENP)
Examineurs	Mr M. NAKIB	Chargé de cours	(ENP)
	Mr B. MAOUCHE	Professeur	(USTHB)
	Mlle F. HADDOUM	Doct. Ing.	(ENP)
	Mr A. NAAMANE	Chargé de cours	(ENP)
INVITES	Mr F. OUERDANE	Direct. st. de traitement	(EPEAL)

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département : Génie de l'environnement
Sujet proposé par : R. Desjardins (professeur)
Dirigé par : A. Kettab (maitre de conférences)
Etudié par : Melle Sadjia Aroua (ingénieur en génie de l'environnement) Diplômée de l'ENP.

- الموضوع : تصفية المياه السطحية المؤهلة للإستهلاك عن طريق التجميد والتندف بمجمدات معدنية جديدة.

- الملخص : تتم عملية التصفية للمياه المؤهلة للإستهلاك عن طريق التجميد والتندف باستعمال مجمدات كيميائية سابقة الإمالة والتناطة من أملاح الألمنيوم والحديد. أجريت هذه التجربة على عينات مائتة من سد قدارة بالجزائر، وأخرى من واد سانت ياسنت بكندا. ثبت من خلال هذه الدراسة مجموع خصائص فيزيوكيميائية ووظيفية لهذه المنتجات، حيث أوضحت أهميتها وفعاليتها في تصفية المياه السطحية الجزائرية.

Sujet:

Etude de la coagulation-floculation par de nouveaux coagulants sur les eaux de surface.

Résumé:

Notre travail consiste en un traitement de clarification de l'eau destinée à la consommation par l'emploi de coagulants préhydrolysés et prépolymérisés à partir des sels d'aluminium et de fer. Les essais "jar-test" sont effectués sur deux eaux différentes par leur charge : L'eau du barrage Keddara et celle de la rivière Sainte-Yacinthe.

Une étude des propriétés physico-chimiques et fonctionnels de ces produits nous a été utile pour mieux comprendre leur rôle en traitement et l'intérêt qu'ils suscitent présentement sur l'eau de surface en Algérie.

Subject:

Study of coagulation-floculation by new coagulants on surface waters,

Abstract:

Our work consist of water clarification traitment destined to be consummed by using coagulants prehydrolysed and prepolymerized from aluminium and iron salts. The "jar-test" are effected on two different characteristics waters : Keddara barrage water (Algiers) and Sainte-Yacinthe river water (Canada).

The present study summarizes the physical, chemical and functional properties of the different coagulants to help understand the behavior of the compounds in the water traitment applications and the level of interest currently raised by these products in Algiers surface waters.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe d'affection et de reconnaissance:

A mon père pour son sacrifice consenti à mon égard;

A ma mère pour son soutien moral durant toute ma formation;

A la mémoire de mon oncle très regretté qui nous a transmis l'amour de la science;

A ma cousine Najet qui m'a toujours aidée et soutenue;

A mes frères et ma soeur; mes cousins et cousines;

A tous les membres de la famille;

A tous mes amis.

— Remerciements —

C'est un grand plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements et ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé lors de la réalisation de cette étude, particulièrement à :

Monsieur Ahmed KETTAB, Docteur d'Etat et Maître de conférence à l'ENP, directeur de cette recherche pour ses conseils, pour l'intérêt porté à ce travail et pour la confiance qu'il a su me témoigner.

Monsieur le Professeur R.KERBACHI d'avoir bien voulu présider ce jury. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude.

Monsieur MAOUCHE, Professeur à l'USTHB, Je le remercie de nous honorer de sa présence en tant que membre de jury.

Monsieur M. NAKIB chargé de cours à l'ENP, Je le remercie d'avoir accepté de participer au jury.

Mademoiselle F.HADDOUM, chargée de cours à l'ENP. Je la remercie d'avoir accepté de participer au jury.

Monsieur A.NAAMANE, chargé de cours à l'ENP, pour sa disponibilité constante à mon égard.

Monsieur F. OUERDANE, Directeur de la station de traitement de Boudouaou qui nous a accordé l'accès au laboratoire.

Monsieur A.BOUDJNOUNE, chef de laboratoire de la station de traitement d'eau de Boudouaou.

Il m'a facilité le travail au niveau du laboratoire par son aide efficace et sa sympathie.

Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus vifs.

Je remercie tous les techniciens ainsi que l'ensemble du personnel de la station de Boudouaou pour leur contribution de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Il m'est également agréable de remercier :

Messieurs les Professeurs R. DESJARDINS et F. BRIERE, le Docteur R.HAUSLER pour leurs précieux conseils .

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de laboratoire de l'Ecole Polytechnique de Montréal pour l'accueil plein de gentillesse qui nous a été réservé et particulièrement Monsieur Denis BOUCHAR pour l'aide technique qu'il nous a apportée .

TABLE DES MATIERES

	Page
I- INTRODUCTION, ORIENTATION DE L'ETUDE	
1 - Introduction	1
2 - Orientation de l'étude	2
 II- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA COAGULATION-FLOCULATION	
A- GENERALITES	3
1- PARTICULES PRESENTES DANS L'EAU	
a - Particules en suspension	
b - Particules organiques dissoutes	
c - Particules colloïdales	
2- L'ETAT COLLOÏDAL	
a - Affinité des particules pour l'eau	
- Les particules hydrophiles	
- Les particules hydrophobes	5
b- Théorie de la double couche	
- Potentiel de nerst	
- Potentiel Zéta	
c- Influence de la force ionique sur le potentiel Zéta	7
 B - LA COAGULATION.	
1- DEFINITION	
a- Compression de la double couche diffuse	
b- Adsorption et neutralisation de la charge	8
c- Flocculation ou adsorption de macromolécule	
d- Enlèvement des particules dans un précipité.....	9
 2- COAGULATION, ESPECES ACTIVES ET MECANISMES	

3 -FACTEURS INFLUENCANT LA COAGULATION

13.

Facteurs liés à la qualité de l'eau brute

a - PH et alcalinité	
b - Turbidité	15
c - Couleur et matières organiques	
d - Les sels dissous	16
e - Température	

Facteurs liés au traitement

a - Nature et dosage du coagulant.....	
b - Mélange rapide	
c - Nature et dosage de l'aide coagulant	17

4- OBJECTIFS DE LA COAGULATION

a- Obtention d'une turbidité minimum	
b- Obtention d'une couleur minimum	
c- Désinfection finale efficace	
d- Obtention d'un floc de bonne qualité	
e- Obtention d'un PH final optimal	
f- Teneur en aluminium ou en fer résiduel minimale	
g- COT minimal et élimination des précurseurs de trihalométanes	18
h- Efficacité à basse température	
I- Autres applications	19

C- LA FLOCCULATION

a- Flocculation péricinétique	
b- Flocculation orthocinétique	

D- EVOLUTION DES AGENTS DE COAGULATION22

E- LA CHIMIE DES POLYMERES BASIQUES

a- Aspects généraux	
b- Hydrolyse et nature des espèces résultantes	23
c- Cinétique des réactions	25
d- Synthèse industrielle des polymères basiques	26
e- Stabilité et stabilisation des polymères basiques.....	

**III - PRESENTATION DE LA RETENUE DE KEDDARA, DE
 L'USINE DE TRAITEMENT DE BOUDOUAOU**

1- Retenue de Keddara27
 2- L'usine de traitement de Boudouaou

IV- MATERIEL ET METHODES.....29

A- PRELEVEMENT

B- MATERIEL

C- METHODE31

1- Le jar test
 2- Mesure de la turbidité..... 32
 3- Mesure du pH
 4- Mesure du TAC
 5- Mesure du degrés de couleur
 6- Mesure de l'Al et du Fe résiduels..... 33
 7- Mesure de l'oxydabilité au $KMnO_4$
 8- Mesure du COT et du COD
 9- Préparation des solutions coagulantes..... 34

- a- PCBA: 0,1 M, r=2,5
 b- PSBA: 0,1M, r=1,5
 c- PCBF: 0,1M, r= 2

10- Méthode d'interprétation des résultats par le diagramme
 d'Amirtharajah.

V - RESULTATS - DISCUSSION..... 35

**1- Résultats des tests effectués conjointement sur l'eau de
 Keddara et l'eau de la rivière Ste Yacinthe :**

A-TURBIDITE
 B- COULEUR 48
 C- MATIERES ORGANIQUES 57
 D- pH ET ALCALINITE 63

**2- Résultats des tests effectués exclusivement sur l'eau de
Keddara :**

E- AI ET FER RESIDUEL	70
F- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE	73
G- INFLUENCE DU GRADIENT DE VITESSE EN PHASE DE MELANGE RAPIDE	75
H- INFLUENCE DU TEMPS DE MATURATION SUR L'EFFICACITE COAGULANTE DES POLYMERES BASIQUES	77
I- ETUDE ECONOMIQUE	79

VI- CONCLUSION GENERALE PROPOSITIONS.....	83
--	----

VII- ANNEXES	88
--------------------	----

VIII- BIBLIOGRAPHIE	113.
---------------------------	------

I - INTRODUCTION-ORIENTATION DE L'ETUDE

1- INTRODUCTION:

Les eaux de surface constituent une source importante d'approvisionnement en eau potable.

Pour rendre ces eaux consommables, on a recours à leur traitement qui consiste à leur faire subir des modifications physico-chimiques ou biologiques, dans une chaîne de traitement classique (tableau 1) qui ne cesse de s'améliorer. Nous citons à titre d'exemple, l'utilisation de :

- produits désinfectants comme l'ozone (O₃) et le dioxyde de chlore (ClO₂) qui assurent une meilleure désinfection que celle obtenue par une chloration ordinaire (HClO),
- du charbon actif biologique précédée d'une ozonation ayant pour effet d'améliorer l'enlèvement de la couleur et de diminuer les précurseurs de trihalométhanes.

Le développement des techniques de décantation et de filtration des eaux a permis la réduction de la taille des équipements.

Par ailleurs, le raffinement des techniques de laboratoire permet la mesure précise des concentrations de substances contenues dans une eau.

Entre temps la croissance démographique et l'industrialisation augmentent la quantité et la diversité des déchets rejetés dans les rivières et les lacs, donnant naissance à de nouveaux problèmes de pollution (virus, métaux lourds, micropolluants, trihalométhanes) que le spécialiste doit résoudre techniquement et de façon économe.

Rappelons que le but essentiel du traitement de l'eau, est de débarrasser celle-ci des substances sources de problèmes esthétiques comme la turbidité et la couleur, et ceux à caractères toxiques.

Dans le cadre d'une recherche globale visant à l'amélioration de la chaîne de traitement, nous nous sommes particulièrement intéressés au traitement de clarification qui consiste en une coagulation-floculation :

les particules colloïdales de dimensions inférieures à 500 nm, ne sauraient être éliminées par simple décantation-filtration et peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes de temps et même traverser un filtre très fin.

Pour éliminer ces particules, on a recours au procédé de coagulation - floculation:

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules colloïdales c'est-à-dire faciliter leur agglomération par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques dits coagulants.

La floculation a pour objectif de favoriser le contact entre les particules déstabilisées, à l'aide d'un mélange lent. Ces particules s'agglutinent pour former un floc facilement éliminable par décantation et filtration.(3), (4), (28).

Pour optimiser le traitement de clarification, on peut avoir recours à l'amélioration des techniques de traitement, ou à l'utilisation de produits les plus efficaces, voir les plus sélectifs.(38)

Prétraitement	Clarification	Filtration	Désinfection
dégrillage désablage	coagulation floculation	sur sable ou charbon actif	CL ₂ , ClO ₂ , O ₃ .
sédimentation préchloration	floculation		

Tableau 1: Chaîne classique de traitement de l'eau de consommation.

2) ORIENTATION DE L'ETUDE.

Les sels métalliques et en particulier l'alun (sulfate d'aluminium) sont utilisés depuis fort longtemps dans le traitement des eaux par coagulation. L'évolution de la qualité des eaux brutes, d'une part, et l'évolution des objectifs de traitement, d'autre part, se traduisent à l'heure actuelle par la mise au point et l'emploi de coagulants différents, notamment de certains dérivés de l'aluminium de plus en plus pré-polymérisés et de moins en moins acides comme les poly-aluminochlorures (PAC) et les polyaluminosulfates (FAS).

A travers notre étude, nous nous sommes proposés de :

d'approfondir l'étude théorique des mécanismes de la coagulation en précisant les nombreux facteurs physiques et chimiques qui les influencent,

de tester de nouveaux coagulants:

- Polysulfate basique d'aluminium (PSBA)
- Polychlorure basique d'aluminium (PCBA)
- Polychlorure basique de fer (PCBF)
- Poly-alumino- silicate sulfate (PASS) ,

En comparaison des sels d'origine:

- Sulfate d'aluminium
- Chlorure d'aluminium
- Chlorure de Fe.

par la technique du jar-test sur deux eaux différentes par leur charge : l'eau peu chargée du barrage Keddara (Alger) et l'eau fortement chargée de la rivière Sainte-Yacinthe (Quebec-CANADA),

enfin, d'évaluer les effets et les propriétés physico-chimiques de ces coagulants en vue de définir leur domaine d'application respectif et faciliter l'interprétation des divers essais en cours et à venir.

II - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA COAGULATION-FLOCCULATION

A/- Généralités

1-PARTICULES PRESENTES DANS L'EAU

a- *Particules en suspension.*

Les substances en suspension, généralement visibles à l'œil nu, déterminent la turbidité. Ces matières sont décantables naturellement ou peuvent être retenues par filtration. Leurs origines et leurs dimensions sont très variées (28) (voir figure 1).

b- *Particules organiques dissoutes*

Elles proviennent des rejets industriels et urbains, et de la dissolution par l'eau de pluie, des végétaux décomposés présents dans les couches superficielles des terrains.

Ces matières organiques solubles sont très souvent à l'origine de la coloration de l'eau ou du mauvais goût.

On peut en apprécier globalement l'importance par la quantité de permanganate de potassium qu'elles sont susceptibles de décolorer, valeur que l'on exprime sous le terme "d'oxygène cédé par le permanganate" ou "d'oxydabilité au permanganate".(28), (3).

c-*Particules colloïdales*

Ce sont des éléments présents dans l'eau dans un état intermédiaire entre l'état dissous et l'état solide. Il s'agit de très petites particules solides, invisibles à l'œil nu, dotées à leur surface, de charges électriques qui se repoussant les unes les autres, les maintiennent en suspension, et déterminent aussi la turbidité.(28),(27).

2- L'ÉTAT COLLOÏDAL:

a-Affinité des particules colloïdales pour l'eau:

Les particules colloïdales sont soit hydrophiles, soit hydrophobes:

-Les particules hydrophiles:

Les particules hydrophiles sont en général des particules organiques qui sont à l'origine de la couleur. Elles sont entourées de particules d'eau (par liaison hydrogène) qui préviennent tout contact ultérieur entre particules. Elles sont donc stabilisées. Parmi les substances de cette nature, on peut nommer les protéines, en particulier l'albumine, la gélatine, la caséine, les polysaccharides, l'amidon, la dextrine, la peptine, la lignine, les savons et les

matières humiques. Ces derniers sont les principaux constituants de l'eau naturelle.(3), (27).

-Les particules hydrophobes:

Les colloïdes hydrophobes ont peu d'affinité pour l'eau, le milieu dispersif. Ce sont en général des particules inorganiques, comme par exemple la silice, les colloïdes d'argile, qui sont la principale cause de la turbidité des eaux brutes. Ces particules sont caractérisées par leur charge électrique qui les stabilise et est moins importante que dans le cas des particules hydrophiles qui sont supplantées par la forte hydratation de la macromolécule.(3),(27),(4).

Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les sols hydrophobes, car il faut agir d'abord sur l'eau qui les entoure, c'est-à-dire les dissolvater pour permettre leur agglutination.

En fait, peu de particules sont exclusivement hydrophobes ou hydrophiles; on retrouve plutôt des particules hydratées à différents degrés (3).

b-Théorie de la double couche:

Dans une eau de surface, les particules colloïdales possèdent habituellement une charge électrique négative située à leur surface. Ces charges dites primaires, attirent les ions positifs en solution dans l'eau, lesquels adhèrent fortement à la particule, formant la couche liée (de Stern) et attirent à leur tour des ions négatifs, accompagnés d'une faible quantité d'ions positifs, formant la couche diffuse (voir figure 2) ou la couche de GOUY.

Il y a donc un gradient électrostatique entre la surface de la particule et la solution.

-Potentiel de Nerst:

C'est le potentiel présent à la surface de la particule. Il varie à peu près linéairement à l'intérieur de la gaine que constitue la couche fixe.

- Potentiel zêta:

Il est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel Zêta diminue et la stabilité diminue.

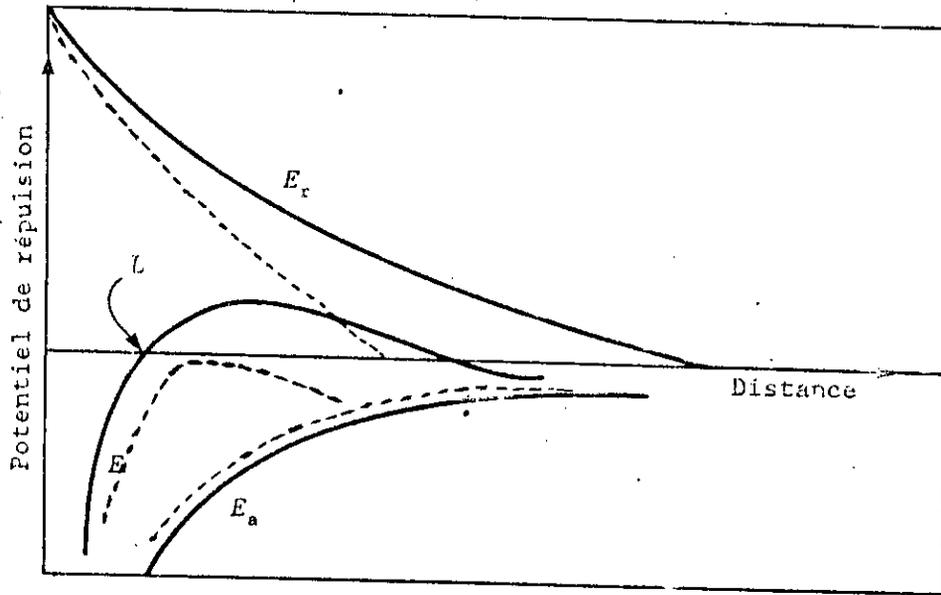
La valeur a (figure 2) détermine le plan de cisaillement. C'est la limite entre la partie de la solution qui se déplace avec la particule et la partie de la solution qui se déplace indépendamment de la particule. Pour une particule hydrophobe, il est situé à la limite extérieure de la couche d'eau liée à la particule.(27),(4),(3).

Le potentiel qui existe entre la surface délimitant l'entité mobile et la surface extérieure de la couche diffuse, s'appelle potentiel Zêta.

Ce potentiel Zêta est défini par l'expression:

$$Z = 4 \pi e q / D$$

Z = potentiel Zêta



— Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules.

- - - Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules, après compression de la double couche.

figure 3

e = épaisseur effective de la couche diffuse
 q = charge de l'entité mobile, par unité de surface
 D = constante diélectrique du milieu

c-Influence de la force ionique sur le potentiel Zéta:

Le potentiel électrostatique est influencé par la force ionique μ de l'eau .

$$\mu = 1/2 \sum C_n Z_n^2$$

μ : force ionique .

C_n : concentration de l'ion n (mole/l).

Z_n : valence de l'ion n .

Une augmentation de la force ionique comprime la couche diffuse vers la particule ce qui réduit le potentiel Zeta des particules hydrophobes. Pour les particules hydrophiles, il faut plutôt agir sur la couche d'eau liée lorsqu'on veut favoriser leur agglomération.(3).

B - La Coagulation:

1- DÉFINITION:

La coagulation est la première étape de la déstabilisation et consiste essentiellement à neutraliser ou diminuer la charge électrique (potentiel Zéta) de la particule et à favoriser le rapprochement des particules. La floculation est alors déjà amorcée et la frontière entre les deux étapes relativement arbitraire. (1).

Une coagulation efficace fait intervenir plusieurs des mécanismes suivants:

a- Compression de la double couche diffuse:

Deux particules chargées dans l'eau sont soumises à deux forces:

- une force de répulsion due à l'interaction de leurs couches diffuses. Tout comme le potentiel électrostatique, le potentiel de répulsion chute plus rapidement en fonction de la distance lorsque la force ionique est élevée (3),(39)

- une force d'attraction ou force de Vander-Walls qui dépend des atomes qui constituent les particules et de leur densité. Contrairement aux forces de répulsion, les forces de Vander-Walls ne sont pas affectées par les caractéristiques de la solution.

L'effet global entre les deux particules est représenté par la résultante E (voir figure 3).

A une certaine distance critique L , la force de répulsion l'emporte et les particules sont continuellement en mouvement. On peut agglomérer les particules en réduisant le potentiel de répulsion entre les particules en augmentant la force ionique de la solution grâce à l'ajout d'ions supplémentaires tant positifs que négatifs et de préférence doublement ou triplement chargés de façon à contribuer fortement à la force ionique globale. Ainsi on comprime la couche diffuse vers la particule. Dans la zone

située près de la particule, les forces de vander-Walls sont alors assez importantes pour neutraliser la force de répulsion.(3),(27),(40) (voir figure 3).

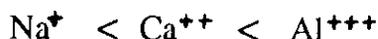
L'épaisseur δ du nuage ionique (en Å) est donnée par la formule suivante:

$$\delta = 0,4 / \sqrt{\sum c Z^2}$$

c : concentration molaire de chaque espèce.

Z : valence de l'espèce.

Comme Z intervient au carré, on peut prévoir que l'effet des di- et tri- valents sera nettement supérieur à celui des monovalents: C'est la règle de Schulze-Hardy. On a notamment:



Cette règle n'est que qualitative, car d'autres facteurs jouent également comme le pH, la température, la durée, le comportement particulier du cation, (hydratation, polymérisation, hydrolyse), et la nature de l'anion correspondant. La présence des matières organiques peut inhiber l'effet électrostatique de coagulation en s'adsorbant sur les particules, c'est ce que l'on nomme peptisation.

Ce mode de coagulation est caractérisé par son absence de spécificité : Toutes les couches diffuses sont également contractées et la dose de coagulant n'obéit à aucune relation stoechiométrique

b- Adsorption et neutralisation de la charge:

Les particules colloïdales peuvent être déstabilisées par adsorption (ou dépôt) à la surface des particules des ions du coagulant lui-même ou de ses produits de réaction avec l'eau. La partie non adsorbée du réactif contribue néanmoins à la coagulation par effet électrostatique. Ce processus est plus efficace que celui de la coagulation électrostatique:

l'adsorption est une force tellement vive qu'elle peut mener à la coagulation de particules de même signe que le réactif (Ex: argile).

Ici la dose active de coagulant est très étroite et obéit à une relation stoechiométrique. Tout excès de réactif mène à la restabilisation de la suspension.

D'autre part l'adsorption étant proportionnelle à $1/T^\circ\text{K}$, le processus se déroulera mieux à froid qu'à chaud, du moins théoriquement car le fait n'a jamais été confirmé de façon nette. (Mohtadi-74).

Ici le coagulant actif est la forme dissoute. La présence d'espèces dissoutes est optimisée à pH =7,2 pour l'aluminium et à la plage de pH compris entre 5,5 à 8,5 pour le fer; valeurs de pH à ne pas confondre avec ceux du minimum de solubilité d'hydroxyde de fer et d'aluminium respectivement 8 et 6.

c- Flocculation ou adsorption de macromolécules :

Ce n'est qu'un cas particulier de la coagulation par adsorption, où le coagulant est un polyélectrolyte ou une macromolécule. Dans ce cas la dose du réactif est déterminée par une relation stoechiométrique tout excès menant à la restabilisation. Etant donné le prix élevé de ces polyélectrolytes,

on les emploie comme adjuvants de floculation pour compléter le travail de l'Al ou du Fe.(2),(3),(4)

**d- Emprisonnement des particules dans un précipité:
balayage ou " sweep coagulation":**

La déstabilisation des particules colloïdales se fait en les emprisonnant dans une particule de floc en formation constitué de molécule $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$ habituellement avec une quantité suffisante de sels de métaux trivalents $Al_2(SO_4)_3$ ou $FeCl_3$. Les particules colloïdales jouent le rôle de noyaux (3). Moins il y a de particules colloïdales en suspension à floculer, plus la dose doit être forte. C'est pourquoi on renforce parfois artificiellement la suspension à floculer par un colloïde à grande surface, appelé adjuvant (principalement la bentonite et la silice activée). On retombe alors dans le cas de la coagulation par adsorption avec des doses plus économiques en Fe et Al vu que $Al(OH)_3$ et $Fe(OH)_3$ présentent des surfaces spécifiques très élevées. (1), (2), (3).

2- COAGULATION, ESPECES ACTIVES ET MÉCANISMES

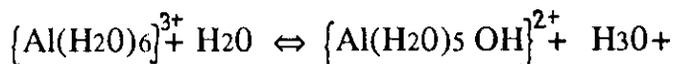
Dès qu'on ajoute un dérivé d'Al ou de Fe dans une eau brute, de nombreux phénomènes peuvent avoir lieu ainsi que le résume les figures (4a) et (4b) sans préjuger des cinétiques de ces réactions dont plusieurs sont simultanées et ou réversibles.

En pratique, les deux voies menant à une coagulation efficace (E et F1) peuvent exister simultanément, mais la contribution de chacune peut devenir nettement prépondérante ou tout à fait négligeable.

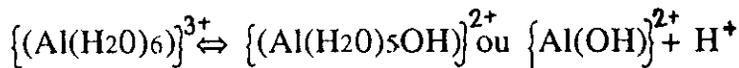
En solution, l'alun libère des ions Al^{3+} solvates par 6 molécules d'eau. Ces ions ne jouent à peu près aucun rôle dans la coagulation et ils ne sont présents qu'en dessous d'un pH de 4,5.

Etape A.

Au dessus de ce pH, la réaction d'hydrolyse est immédiate et s'écrit :



Soit de façon simplifiée:



Ce qui met en évidence le caractère acide de la solution.

Si la concentration est assez faible et s'il y a suffisamment de substances alcalines, l'équilibre se déplace vers la droite et d'autres molécules d'eau se dissocient, conduisant à des radicaux hydroxy-alumineux (ou complexes aqueux) dont les domaines d'existence sont fonction du pH; représentés par les molécules suivantes après omission des molécules d'eau:

$(Al(OH))^{++}$	$4 < pH < 6,5$ (soluble)
$(Al(OH)_2)^+$	$3 < pH < 6$ (soluble)
$Al(OH)_3$	$5 < pH < 10$ (très peu soluble)

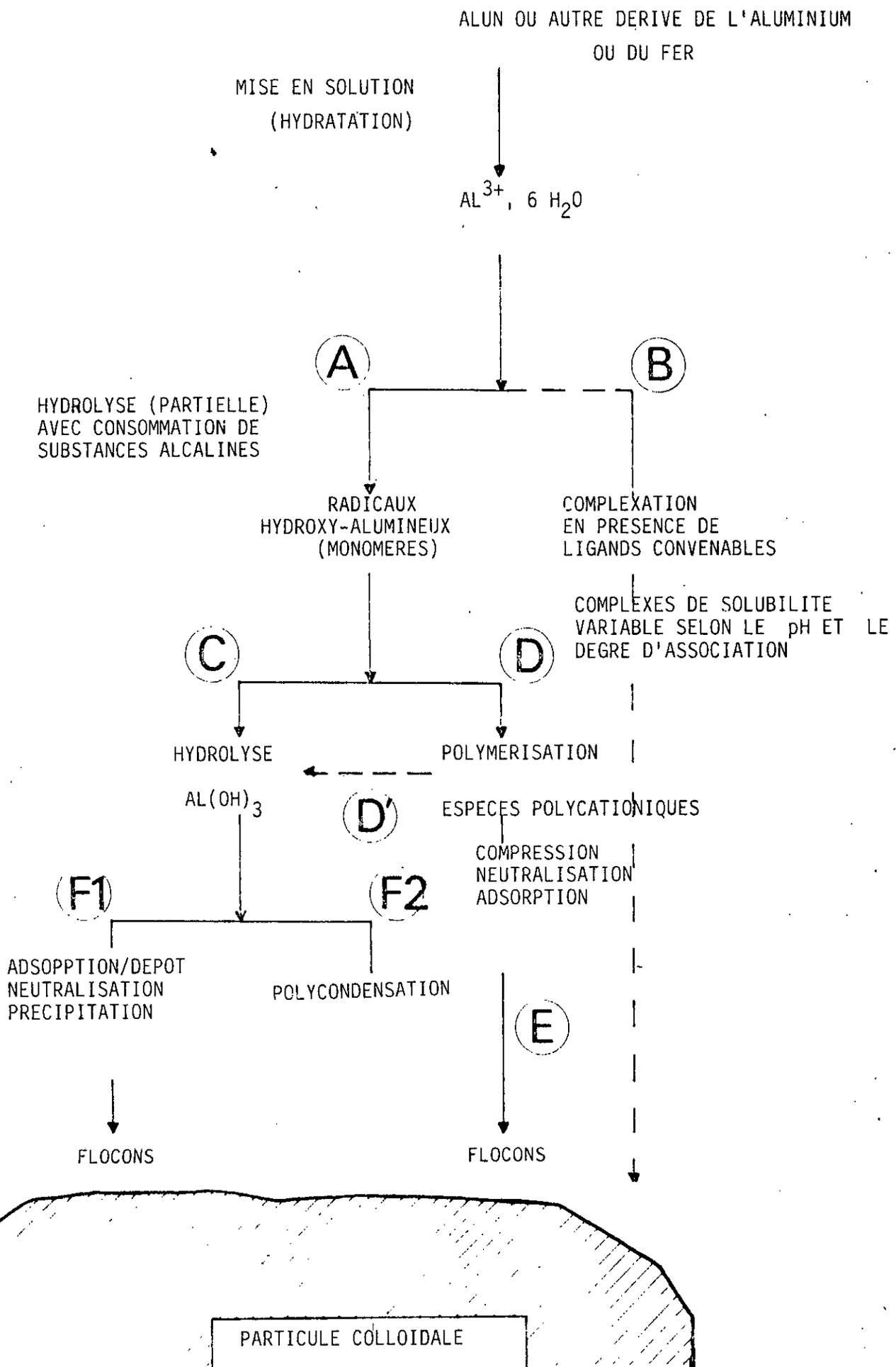
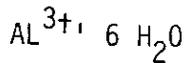


FIGURE 4a; LES DIFFERENTS MECANISMES SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR DANS LA COAGULATION

ALUN OU AUTRE DERIVE DE L'ALUMINIUM
OU DU FER



ION TRIVALENT SOLVATE PAR 6
MOLECULES D'EAU

RADICAUX
HYDROXY-ALUMINEUX
(MONOMERS)

COMPLEXES DE SOLUBILITE VARIABLE
SELON LE pH ET LE DEGRE
D'ASSOCIATION

$Al(OH)_3$
CRISTALLISE
OU AMORPHE CHARGE
PAR ADSORPTION
OU NON

ESPECES
POLYCATIONIQUES

MICRO- flocons
"LIBRES"
 $Al(OH)_3 (S)$

FLOCONS

flocons

PARTICULE COLLOIDALE

FIGURE 4b; LES DIFFERENTS ESPECES SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR DANS LA COAGULATION

$(Al(OH)_4)^-$ $8 < pH < 10$ (soluble)

L'hydroxyde d'Aluminium $Al(OH)_3$ est très peu soluble surtout dans l'intervalle de pH compris entre 5,5 et 7,5. L'hydroxyde de fer $Fe(OH)_3$ est très peu soluble à $pH = 8$.

Etape B.

Parallèlement, l'aluminium donne de nombreuses associations, et, si l'eau contient des ligands en quantité suffisante, il y a complexation. Ainsi, les anions fluorures (F^-), sulphates (SO_4^{2-}) et phosphates (PO_4^{3-}), conduisent toujours selon le pH, à des complexes de structures et de solubilité variables comme: $(AlF_2)^+$ AlF_3 $(AlF_6)^{3-}$ etc...

Si ces complexes sont solubles, on les retrouve à la fin du traitement et peuvent être source d'aluminium ou de fer résiduel.

S'ils sont peu solubles, on pourra les éliminer par décantation.

Des matières organiques peuvent également former des chélates solubles en particulier certaines substances humiques. Il semble que ces réactions soient relativement lentes.

Etape C.

Comme on l'a souligné, l'hydroxyde d'aluminium très peu soluble entre pH : 5,5 et 7,5, tend à précipiter, soit sous forme amorphe soit sous forme cristalline, conduisant à des microflocos. Il s'agit en fait d'une véritable polymérisation puisqu'elle s'effectue avec élimination de molécules H_2O , il y a donc polycondensation.

Au pH isoélectrique, ces microflocos sont électriquement neutres. Au pH inférieur à cette valeur, ils ont un potentiel Zéta positif dû à l'adsorption d'espèces positives monomères comme $(Al(OH))^{++}$ ou $(Al(OH)_2)^+$ ou d'espèces polycationiques.

Au pH plus élevé, l'adsorption de $Al(OH)_4^-$ se traduit par une charge négative

Etape D.

Les radicaux hydroxy-alumineux monomères tendent à former par polymérisation des espèces comportant des charges positives élevées et régulièrement réparties ex : $(Al_2(OH)_2)^{4+}$, $(Al_{13}(OH)_{32})$ Notons que certaines de ces espèces polycationiques ont une durée de vie très courte, et tendent à s'hydrolyser et à se dépolymériser (voir D').

Etape E: coagulation.

Ces espèces polymérisées et fortement chargées peuvent jouer un rôle très important dans la coagulation, à la fois par compression de la couche diffuse, adsorption et neutralisation des charges.

Dans ce mécanisme, le dosage de coagulant est relativement faible et dépend surtout de l'interface colloïdale disponible. En cas de surdosage, il y a possibilité de restabilisation des colloïdes devenus positifs. Le floc obtenu est constitué essentiellement des particules initiales (et de l'aluminium adsorbé). Enfin, selon la taille de l'espèce polycationique et la répartition des centres actifs, il y a possibilité de pontage entre plusieurs particules ce qui accélère grandement la floculation.

Etape F1: coagulation.

La voie F1 est sans doute celle que l'on recherche le plus à optimiser dans les procédés classiques utilisant l'alun. Dans ce cas, la polycondensation de l'hydroxyde est favorisée par la rencontre avec les particules colloïdales, jouant le rôle de noyaux de précipitation, et, l'on obtient un floc abondant constitué essentiellement d'hydroxyde d'Al ou de Fer.

Cela exige:

-Une sursaturation en $Al(OH)_3$ (ou $Fe(OH)_3$) et donc un dosage élevé de coagulant ainsi que des conditions précises de pH et de température.

-Une grande surface disponible, soit en pratique une forte concentration de particules et donc une turbidité appréciable.

-Une température assez élevée pour favoriser les chocs, augmenter leur efficacité et donc la vitesse de la réaction de polycondensation.

Etape F2.

Si les conditions ne sont pas favorables et en particulier s'il y a peu de particules colloïdales, c'est la voie F2 qui l'emporte. La polycondensation ne se poursuit que lentement, surtout à basse température. On obtient des microflocs "libres" d'alumine hydratée qui risque d'être une source d'aluminium résiduel, si la filtration pour une raison quelconque vient à être moins efficace particulièrement dans les stations où le temps de séjour est court.

Le schéma (5) illustre les 2 principaux mécanismes de coagulation: adsorption-neutralisation (par les espèces solubles d'aluminium hydrolysés) et sweep coagulation (par l'hydroxyde d'Al) (24), (9).

3 _ LES FACTEURS INFLUENCANT LA COAGULATION

De nombreux facteurs influencent le mécanisme et l'efficacité de la coagulation. Certains sont liés à la qualité de l'eau brute, d'autres le sont au traitement lui-même.(1)

** Facteurs liés à la qualité de l'eau brute.*

a- pH et alcalinité.

Le pH est l'un des facteurs les plus importants puisqu'il décide de la nature des espèces présentes et de leur solubilité.

Pour favoriser la voie F1, le pH doit être étroitement contrôlé, si l'on veut obtenir un maximum de précipitation de l'hydroxyde de métal(Al ou Fer).

Pour la voie E, le facteur pH est beaucoup moins limitant.

Les réactions d'hydrolyse consomment de l'alcalinité.

Exemple de la réaction de neutralisation complète de l'alun en présence d'un bicarbonate :

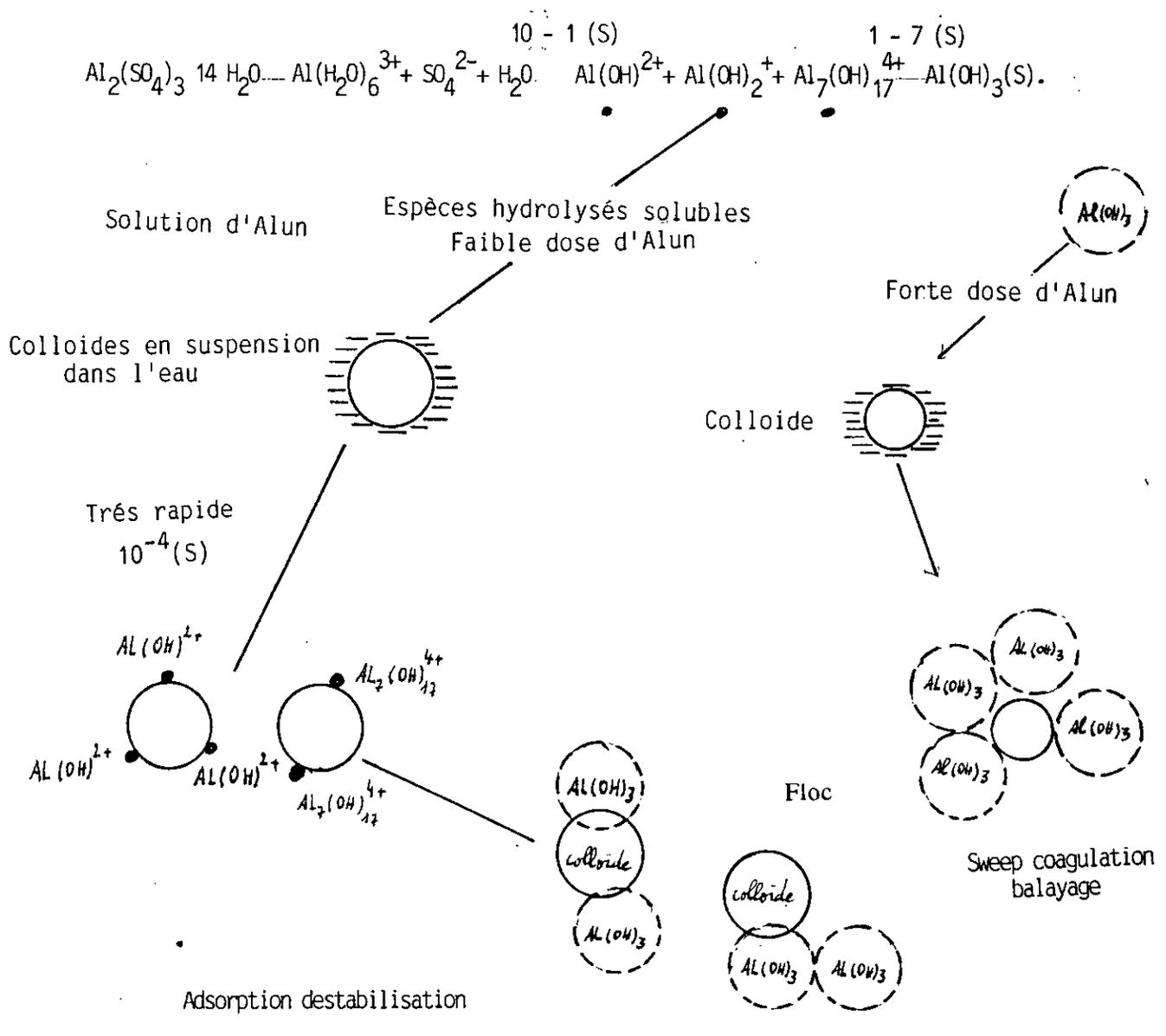
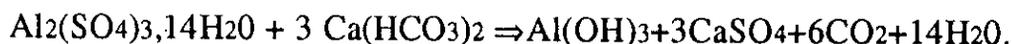


Figure 5: Schéma des mécanismes réactionnels de la coagulation.



En tenant compte des masses moléculaires des réactifs, soit: 594 g d'alun \rightarrow 300 g de bicarbonate exprimé en CaCO_3 .

On constate qu'une masse x d'alun neutralise une masse x/2 d'alcalinité. (4). L'eau à traiter doit donc contenir suffisamment d'alcalinité pour, en premier lieu neutraliser le sulfate d'aluminium ajouté et en second lieu, maintenir le pH final tout près du pH isoélectrique pour assurer une précipitation maximale d'hydroxyde de métal.(4).

Si l'alcalinité de l'eau brute est insuffisante, il faut l'accroître par une addition de chaux ou de soude avant l'injection du coagulant.

Dans le cas des eaux à pH élevé, on utilise ce phénomène pour abaisser le pH à la valeur optimale.(4).

Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter.(3).

b - Turbidité.

Si en règle générale, la dose des sels de métaux augmente avec la turbidité, il est bien connu que les eaux très turbides flocculent rapidement. Cela s'explique par l'importance de la "surface" disponible indispensable pour favoriser la voie F1(1).

On peut faire les constatations générales suivantes:

-La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau.(3).

-Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration de coagulant. L'augmentation de la quantité de coagulant ne varie toutefois pas de façon linéaire en fonction de l'augmentation de la turbidité.

-Lorsque la turbidité est due à des particules de diamètres variés, il est plus facile d'effectuer la coagulation que lorsqu'elle est imputable à des particules de diamètres sensiblement égaux.(3)

c- Couleur et matières organiques.

Les matières humiques principales responsables de la couleur sont des matières complexes de composés, de taille, et de structure chimique, différents. On cite entre autres, les acides fulviques et humiques. Ces substances humiques représentent environ la moitié du COT présents dans les eaux naturelles. Elles sont de nature colloïdales et contribuent donc aussi à la turbidité, et à l'efficacité de la coagulation. On les élimine soit par coagulation flocculation, soit par adsorption sur charbon actif, ce qui n'altère pas leur structure ou encore par ozonation, ce qui les décompose en molécules plus simples. Les avis sont d'ailleurs partagés (5) sur l'intérêt de la préozonation qui, selon certains auteurs, affecte l'efficacité de la coagulation en défavorisant la présence de grosses particules, modifiant ainsi le diamètre moyen et la répartition granulométrique (1).

Les mécanismes qui permettent l'élimination de la couleur ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour celle de la turbidité. La quantité de coagulant requis est fonction de la couleur initiale (3).

Il est reconnu qu'une coagulation même optimale ne peut éliminer complètement la couleur, preuve que des espèces colorantes restent ou retournent en solution ne serait-ce que lors du réajustement du pH (1).

Les matières organiques en solution génèrent aussi des noyaux qui influencent le choix du dosage de coagulant peut être tout autant que les particules inorganiques.(6).

d- Les sels dissous :

Les sels dissous dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la floculation :

- modification de la plage de pH optimal
- modification du temps requis pour la floculation
- modification de la quantité de coagulant requis
- modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

La coagulation à l'aide des sels d'aluminium ou de fer est davantage affecté par les anions que par les cations exemple : SO_4^{--} , PO_4^{--}

Les cations Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} exercent une influence minime sur la coagulation (3).

e- Température

La température influence les propriétés physiques comme:

la viscosité, la position des équilibres et donc la valeur du pH, ainsi que la cinétique des diverses réactions en jeu.

Un abaissement de température a pour effet :

- de ralentir les réactions chimiques
- de freiner le mouvement brownien
- de freiner la décantation
- de diminuer la probabilité de collision
- et de favoriser l'adsorption.

Notons qu'à 5°C, la solubilité de l'hydroxyde d'Al est minimale à un pH de 7°, alors qu'à 25°C, le pH correspondant est de 6,2 (10).

** Facteurs liés au traitement*

a- Nature et dosage du coagulant

Rappelons que les mécanismes décrits ci-dessus sont valables aussi bien pour les sels d'Al que pour les sels de Fe.

Même si, l'alun est le coagulant le plus utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par un sel de fer ou par des PAC ou PAS selon les caractéristiques de l'eau à traiter. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale qu'après essai au laboratoire vu la complexité du phénomène .

b- Mélange rapide

L'injection du coagulant doit être extrêmement énergique pour qu'il se disperse rapidement et uniformément dans toute la masse d'eau, ceci est du à :

- à l'importance du contact entre les particules et le coagulant évitant la déperdition de ce dernier dans l'eau.(3.).

- à l'instabilité de certaines espèces (en particulier les espèces polycationiques) qui tendent à s'hydrolyser ce qui défavorise tout spécialement la voie E. (1).

Les usines de traitement doivent donc être dotées de véritables mélangeurs rapides.

c- Nature et dosage de l'aide coagulant.

L'introduction des adjuvants pour améliorer la coagulation se fait surtout dans les cas suivants:

- eau de faible turbidité.
- eau de faible alcalinité.
- eau froide.

Ces adjuvants doivent être injectés sous mélange énergétique avant ou après le coagulant.

On peut citer: l'aluminate de sodium (pour eau de faible alcalinité), la silice activée et les polyélectrolytes synthétiques.

4- OBJECTIFS DE LA COAGULATION

a- Obtention d'une turbidité minimum.

Les normes OMS et Algériennes fixent la valeur maximale à 5 NTU pour les eaux désinfectées.

L'objectif est d'atteindre une turbidité < 1 NTU.

b- Obtention d'une couleur minimale.

La couleur ne peut être complètement éliminée par coagulation floculation. La valeur maximale fixée par l'OMS et Algériennes est de 15 U.Hazen.

c- Désinfection finale efficace.

Elle est liée à l'enlèvement de la turbidité et à la valeur du pH de l'eau.

d- Obtention d'un floc de bonne qualité.

Le floc doit être résistant et facilement décantable. Le dosage doit être tel que la quantité de floc soit limitée de façon à éviter une surproduction de boues et un encrassement rapide du filtre.

e- Obtention d'un pH final optimal.

Le pH final doit être proche de la valeur d'équilibre où l'eau n'est ni agressive ni corrosive de manière à éliminer l'ajout de correctif.

f- Teneur en aluminium ou en Fer résiduel minimale.

Dans la très grande majorité des usines, le traitement s'accompagne d'une hausse de la teneur en aluminium total qui peut être de 6 à 1500 µg/l.(10).

Or, certaines études (25) relieront l'absorption d'une quantité importante d'aluminium dans l'organisme humain à l'apparition de désordres neurologiques tel que la maladie d'Alzheimer, dialysis encéphalopathie, insuffisance rénale.(11).

La quantité d'aluminium ingérée chaque jour par l'homme est de l'ordre de 20 mg et la contribution de l'eau potable est inférieure à 5%. L'aluminium résiduel doit être maintenu à une valeur minimale, évitant du même coup les post-précipitations éventuelles.

-Le pH est le facteur principal qui influence l'aluminium résiduel : la quantité d'aluminium varie 100 fois pour une variation d'une unité de pH (11). La solubilité d'aluminium à pH (6,5-7) est de (0,025-0,075)mg/l comparée à la solubilité d'aluminium à pH:8 qui est de 0,5mg/l (12).

-La température : une basse température peut favoriser la solubilité de l'aluminium en ralentissant les cinétiques des réactions surtout pour la voie F1 (sweep coagulation)(10).

-La présence de ligand (F, SO_4^{--}, PO_4^{--} , substances humiques) favorise la formation de complexes d'aluminium solubles non éliminables par filtration(10).

-Le fer n'est pas un élément nuisible pour la santé. Au contraire c'est même un élément nutritif essentiel. On doit cependant en contrôler les concentrations, et ce pour des raisons d'esthétique. En effet, la présence d'une certaine quantité de fer dans l'eau peut entraîner certains inconvénients. Cela peut:

- donner à l'eau un goût métallique désagréable,
- tacher les tissus lors de la lessive (taches qui vont du jaune au brun)
- tacher les équipements sanitaires (cuvettes de porcelaines, baignoires etc..)
- former un précipité dans les conduites, ce qui favorise la croissance des bactéries ferrugineuses (29),(3).

g-Teneur en carbone organique total minimale (COT) et élimination des précurseurs de THM (trihalométhane).

Etant donné la baisse constante de la qualité des eaux brutes qui contiennent de plus en plus de micropolluants organiques, le traitement doit être aussi efficace que possible pour les éliminer et éviter, lors de la chloration, la formation de trihalométhane.

Or, les substances humiques sont reconnues pour être des précurseurs de THM. La couleur ne constitue pas un bon indice de cette tendance. Par contre, la mesure du COT et l'absorption en UV reflètent la présence des acides humiques (13). Le COT dissous est plus difficile à éliminer.

Par contre une coagulation préalable au sulfate d'aluminium améliore sensiblement l'absorption des matières organiques en solution sur charbon actif.

Enfin, on a rapporté (15) que la pré-ozonation, en oxydant certaines substances organiques, diminue le pourcentage d'enlèvement de DCO par coagulation-floculation.

h- Efficacité à basse température.

Une simple diminution de température de 0,5°C (entre 4,5 et 4°C) entraîne aussi bien avec l'alun qu'avec le chlorure ferrique une augmentation notable de la turbidité de l'effluent(16). Si l'on augmente la dose de coagulant,

une sursaturation de l'hydroxyde de métal importante, entraîne une augmentation du métal résiduel. Ceci est due à la quantité de particules de taille inférieure qui augmente à basse température, et exige un temps de contact assez long pour la coagulation, si l'on veut obtenir une réaction complète du sel de métal.

I- Autres applications.

Nous avons insisté surtout sur la coagulation appliquée à la préparation de l'eau potable. Rappelons que les dérivés de l'Al et du Fer sont également employés dans le traitement physico-chimique des eaux usées où les mécanismes sont similaires avec des problèmes moins liés à la turbidité ou l'alcalinité disponibles qu'à la qualité et au volume des boues produites. Certains procédés industriels nécessitent également une coagulation efficace, en particulier dans le domaine des pâtes et papiers.

C- FLOCCULATION :

Les particules déstabilisées ont tendance à s'agglomérer. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a pour but d'augmenter la probabilité de contact entre les particules et est imputable:

- a- au mouvement brownien des particules (floculation péricinétique).
- b- au déplacement d'une partie du fluide (floculation orthocinétique).(3),(2)

a-Floculation péricinétique:

Les contacts entre les particules sont causés par les mouvements aléatoires de celle-ci dans toutes les directions dits mouvements browniens. La vitesse de floculation ou la variation du nombre de particules au cours du temps est donnée par :

$$- dn / dt = 4 \alpha K T n^2 / 3 \mu .$$

n: nombre de particules par unité de volume.

α : fraction du nombre de chocs productives de floc.

K: constante de Boltzman.

μ : viscosité dynamique de l'eau (Pa.S).

T: température absolue (K)

b- Floculation orthocinétique:

L'agitation de l'eau en déplaçant une partie du fluide, provoque une différence de vitesse dans l'espace. Elle est caractérisée par : G = gradient de vitesse.

Dans un champ d'écoulement laminaire, on peut représenter deux particules d_1 et d_2 sur deux filets liquides parallèles et animés de vitesses différentes (figure 6)

Toute particule d_2 dont le centre pénètre dans une sphère d'influence de rayon $r = 1/2 (d_1+d_2)$ concentrique à d_1 entre en collision avec celle-ci. Le

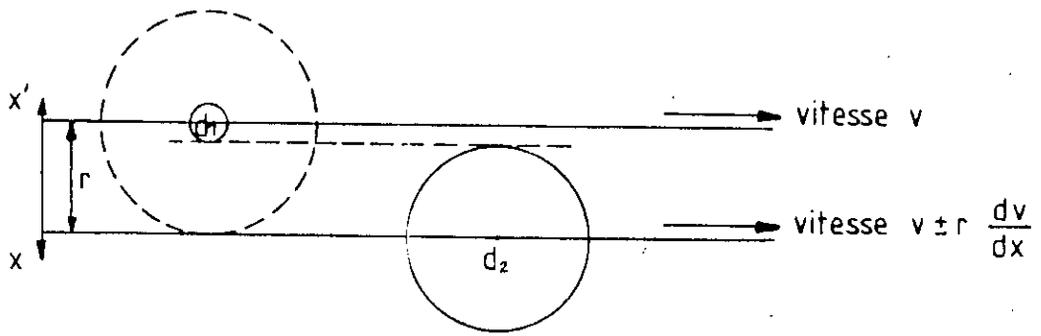


Fig. 6

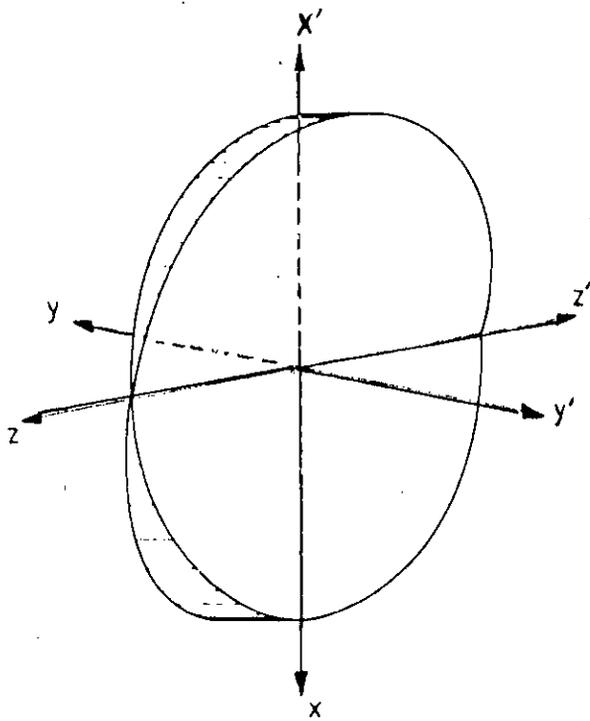


Fig. 7

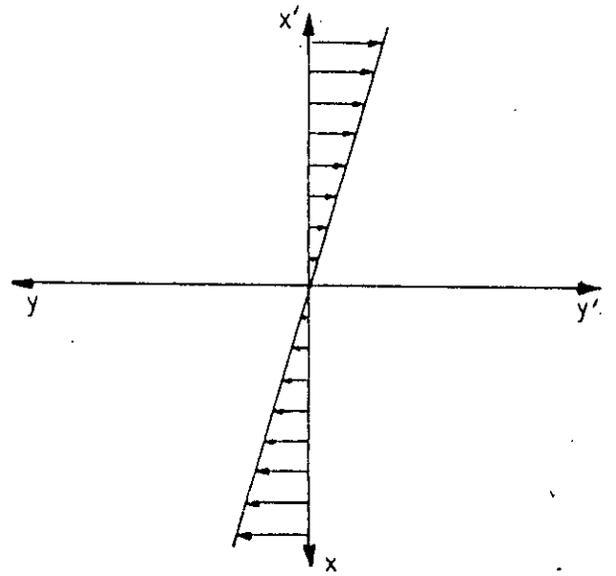


Fig. 7'

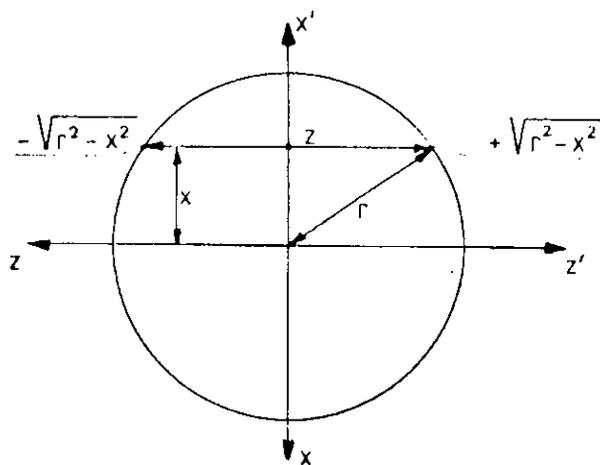


Fig. 8

nombre de particules d_2 pénétrant dans la sphère par unité de temps dépendra de leur concentration n_2 mais aussi de leur vitesse relative par rapport à d_1 . Cette dernière est proportionnelle à r l'écart entre les deux filets porteurs.

Comme le gradient G existe seulement selon $x-x'$ et qu'on a $dv/dy=dv/dz=0$, les particules à considérer sont celles contenues dans un volume délimité par le cylindre ci-dessus, par un plan perpendiculaire à son axe, et, par un autre plan sécant au premier en $y-y'$ par rapport à lui de telle sorte que $y=Gx$. (figure 7.7.8). Chaque demi-volume v en question peut se calculer par l'intégration de:

$$v = \int \int Gx \, dx \, dz \quad \begin{array}{l} x \text{ varie de } 0 \text{ à } r \\ z \text{ varie de } -\sqrt{r^2-x^2} \text{ à } +\sqrt{r^2-x^2} \end{array}$$

$$V = \int_0^r \left[\int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{+\sqrt{r^2-x^2}} Gx \, dZ \right] dx = (2/3) G r^3$$

$$2 \text{ volumes} \Rightarrow 4/3 G r^3 = (4/3) G \left((d_1 + d_2) / 2 \right)^3 = (1/6) G (d_1+d_2)^3$$

Si n_1 et n_2 sont les concentrations en nombre de particules d_1 et d_2 par unité de volume, le nombre de chocs N par unité de volume et de temps vaudra:

$$N = (1/6) n_1 n_2 G (d_1+d_2)^3$$

En pratique, seule une fraction α de chocs est productive de floccs, de sorte que la vitesse de floculation est donnée par:

$$-dn/dt = \alpha N$$

si, $d_1=d$

$n_1=n_2=n$

$$\Rightarrow dn/dt = \alpha \cdot (1/6) n^2 G (2d)^3$$

$$-dn/dt = 4/3 \alpha n^2 G d^3$$

Cette équation indique les facteurs actifs sur la floculation. Le diamètre intervient au cube, la concentration au carré, le gradient à l'exposant 1. En cours de floculation, n diminue et d augmente, mais il est limité par G , car les floccs deviennent fragiles et se rompent. On peut agir sur n en recirculant les boues. (2)

G est calculé selon la formule:

$$G = \sqrt{p/\mu v}$$

μ : viscosité de l'eau

V : volume du bassin

p : puissance dissipée dans le milieu liquide agité

Pour les pâles plates de laboratoire:

$$p = (0,75 \cdot 2\pi \cdot N)^3 \text{ Ct} \cdot \rho \cdot Z \cdot R^4 / 4$$

0,75. 2 π . N = 0,75. V = Vr = vitesse relative de la pâle mesurée par rapport à l'eau qui l'entoure

Ct : coefficient de trainé

ρ : masse volumique du liquide

Z : largeur de la pâle

R : 1/2 longueur de la pâle

D- EVOLUTION DES AGENTS DE COAGULATION

L'hydrolyse des sel de métaux suivant la voie F1 aboutit à la formation de radicaux hydroxyalumineux solubles intermédiaires entre le sel du métal d'origine et la forme finale Me(OH)₃. Il semble donc naturel d'essayer d'améliorer l'efficacité du coagulant en préformant les polymères de métal dans la solution coagulante avant son addition dans l'eau.

Bien que l'étude directe de ces polymères soit très difficile, on peut les préparer en ajoutant des OH⁻ à des Al³⁺ (ou Fe³⁺) et en contrôler les effets en jouant sur (17) :

- le rapport OH/Me dans la préparation.
- la nature et la concentration des corps en présence, surtout des anions.
- la vitesse d'incorporation des OH⁻ aux Al³⁺ ou Fe³⁺ et les conditions de mélange.
- le temps de maturation.
- la température de préparation.

C'est ainsi qu'ont été mis au point des aluns dits basiques (même si le pH de leur solution est encore franchement acide...) qui sont déjà partiellement hydrolysés et donc moins avides d'alcalinité et prépolymérisés et donc moins avides de "noyau" (1). La formule brute est de la forme :



quand X = Cl⁻, il s'agit de poly-alumino-chlorure ou PAC.
quand X = SO₄²⁻, il s'agit de poly-alimino-sulfate.

E- LA CHIMIE DES POLYMÈRES BASIQUES .

a- Aspect généraux

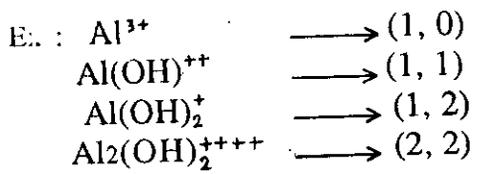
Le caractère amphotère de l'Al et du Fer leur confère une solubilité élevée en milieu acide ou basique, respectivement sous les formes (Al³⁺, Fe³⁺) et (Al(OH)₄⁻, Fe(OH)₄⁻)(18).

La faible solubilité d'hydroxyde de Fe et d'Al qui est au minimum 10^{-10} M et aux pH respectifs de 5,5 à 8,5 et 7,2, conduit à la précipitation de $Fe(OH)_3$ et $Al(OH)_3$ par simple dilution d'une solution contenant du Al^{3+} , Fe^{3+} ou $Al(OH)_4^-$, $Fe(OH)_4^-$ dans une eau neutre (2)

l'évolution des processus subséquents de coagulation, de floculation et de clarification dépend alors d'un ensemble de phénomènes physico-chimiques tels les réactions d'hydrolyse, la nucléation des produits avec les autres substances colloïdales (ou solubles) contenues dans l'eau, les propriétés mécaniques intrinsèques du floc, etc. D'où la complexité qui caractérise les réactions d'hydrolyse du Fe^{3+} et Al^{3+} .

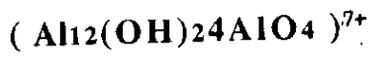
b- Hydrolyse et nature des espèces résultantes :

Les espèces d'hydrolyses peuvent être représentées selon une nomenclature simplifiée indiquant leur degré de neutralisation et de polymérisation, de même que leur charge.



Pour une espèce quelconque (a,b), a et b représentent respectivement les coefficients stoechiométriques de Al et OH.
 Le degré de neutralisation ($r = OH/Al$), est donné par b/a. La charge du complexe est obtenus selon : $3a - b$.

Dans une revue des travaux antérieurs à 1975, BAES et MESMER concluent entre autre : les produits stables résultant de l'hydrolyse de Al^{3+} seraient (1,1), (1,2), (1,3), (1,4), (2,2), (3,4), (13,32) et la gibsite ($\alpha - Al(OH)_3$). Nous reproduisons dans la Fig.9 la distribution en solution des produits d'hydrolyse établi par ces auteurs en fonction du pH pour $AlCl_3$ à $25^\circ C$ et respectivement à 10^{-1} et 10^{-5} M Al (18).
 D'après plusieurs auteurs (20), l'espèce Al_{13} ,



serait la plus importante, (bien que présente en pourcentage variable selon le mode de préparation), une fois formée, sa transformation serait lente, de plus sa structure de type hexagonal, en anneau est analogue à celle de $Al(OH)_3$, solide dont la précipitation est ainsi grandement favorisée.(1).
 Nous en reproduisons la structure dans la Fig.10 telle que déterminée par JOHANSON (1962).

Suite à une investigation détaillée de l'hydrolyse d'Al, Stol et al (1976), concluait : la formation de polymères cycliques (9,18), (10,22), (16,38), etc. (21).

Une étude plus récente (1980), sur le système $AlCl_3$ 0,1M, $r = 0,5 - 2,5$ équilibré pendant 24 h conclut à l'existence des espèces (1,0), (1,1), (2,y), (13,32). (y définit une série de dimères). (22).

D'autres résultats de dosages potentiométriques (VENTURINI & BERTHON-1987) suggèrent : l'hydrolyse de $AlCl_3$ 0,1M dans NaCl 0,15M mène aux espèces (1,1), (1,3), (1,4), (3,11), (6,15) et (8,22). Cet examen illustre la diversité des espèces observées ou proposées comme produit d'hydrolyse d' Al^{3+} .

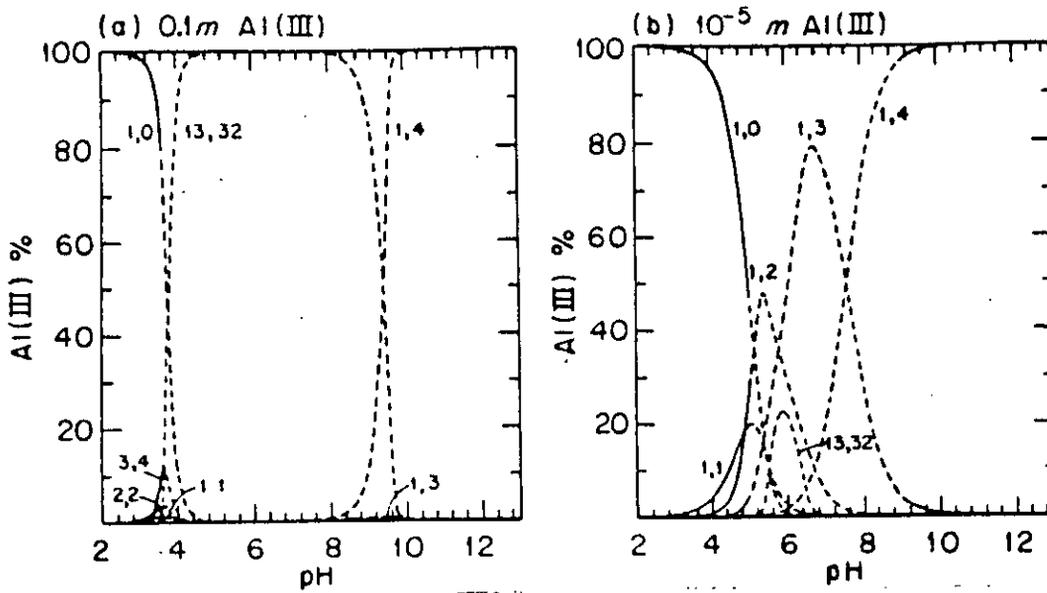


Figure 9: Répartition de Al(III) en espèces monomériques et polymériques en fonction du pH en solution concentrée (0,1 M) et diluée (10⁻⁵ M) selon Baes et Mesmer (1976); (voir le texte pour la désignation des espèces).

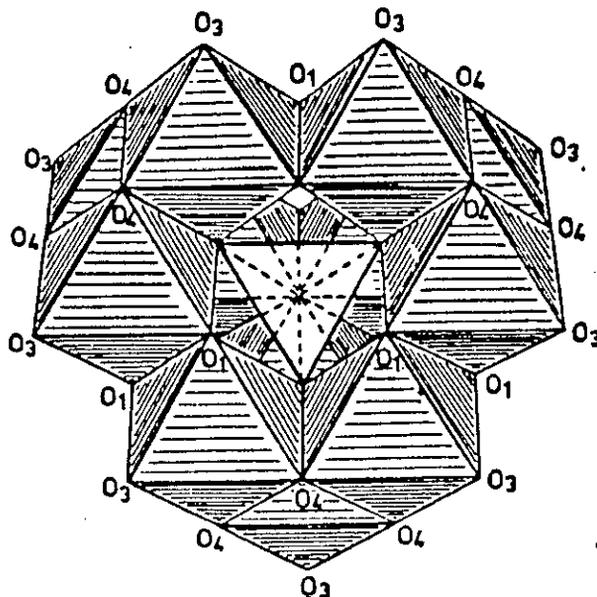
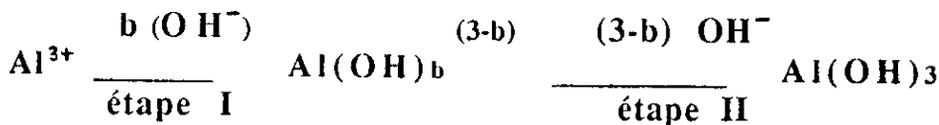


Figure 10: Représentation schématique de la structure de l'ion $[Al_{12}AlO_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$ selon Johansson (1960).

c- *Cinétique des réactions.*

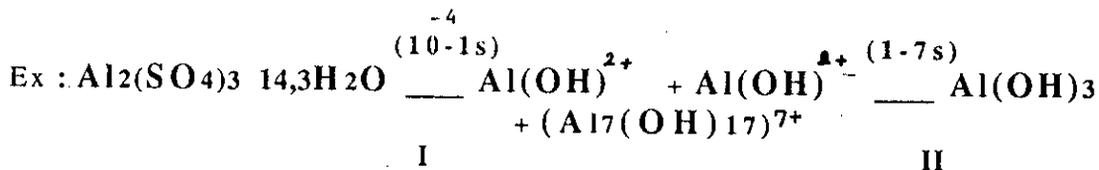
L'aspect cinétique des phénomènes d'hydrolyse, de nucléation, de coagulation, etc, joue évidemment un rôle clé dans le déroulement et le performance du procédé de traitement.

Les espèces essentielles à envisager par rapport à la préparation et à l'utilisation des aluns basiques peuvent être réduites schématiquement comme suit (23) :



Aluns basiques
espèces intermédiaires.

Hydroxyde, amorphe, cristallin.



ETAPE I :

Elle représente la synthèse des polymères basiques soit la formation des espèces intermédiaires : l'hydrolyse partielle de Al ou FeIII et les réarrangements (association, polymérisation) menant au complexe polymérique. Pour des raisons évidentes de rentabilité, cette étape sera exécutée en solution très concentrée et dans des conditions susceptibles de mener à des intermédiaires stables dans un temps de réaction relativement court.

L'adsorption des espèces polymérisées solubles sur les colloïdes et leur déstabilisation se fait en l'espace de microseconde, s'il n'y a pas formation de polymères solubles, et en un temps d'une seconde s'il y a formation de polymères (25).

ETAPE II :

Elle comporte l'hydrolyse subséquente des espèces intermédiaires menant à la formation de complexes insolubles et éventuellement à Al(OH)₃ colloïdal, à la coagulation, etc. En application, cette étape de l'hydrolyse sera évidemment effectuée en milieu très dilué et les vitesses de réaction auront une influence capitale sur le comportement fonctionnel des produits(18). La formation de Al(OH)₃ initiant le mécanisme de "swep-coagulation", est moins rapide que celle des espèces intermédiaires et se passe en un temps de 1 à 7 secondes.(25)

Dans les traitements d'eau qui utilisent l'alun, la solution concentrée de Al est diluée rapidement en milieu neutre et les étapes I et II ont alors lieu de concert. La formation de polymères solubles et d'hydroxydes insolubles sera alors régie par les vitesses de formation et de décomposition (ou réarrangement) des diverses espèces intermédiaires.

d- Synthèse industrielle des aluns basiques.

Pour préparer ces composés, la méthode la plus simple est l'hydrolyse partielle du chlorure ou du sulfate d'Al (ou du Fe), sous l'action d'un alcali (soude, chaux, carbonate,...). En milieu assez concentré et à température élevée(1).

La réaction d'un acide (H_2SO_4 ou $Al_2(SO_4)_3$) avec un gel de $Al(OH)_3$ a également été proposé en synthèse industrielle.

Dans cette réaction, une solution d'un sel d'Al est d'abord neutralisée pour former un gel d' $Al(OH)_3$. Ce gel est ensuite récupéré par filtration et mis à réagir avec H_2SO_4 ou avec l'alun (GUMARSSON & NILSSON - 1986a , ZAPOL'SKI et AL - 1985,1986).

Pour la préparation de nos produits dans ce modeste travail (PCBA, PSBA, PCBF), nous avons procédé à des méthodes de laboratoire détaillées dans la partie expérimentale.

Par ailleurs quelque soit la stratégie de synthèse les produits préparés souffrent de déficience commune au niveau de leur stabilité.

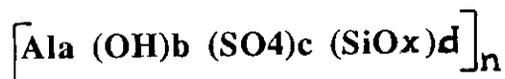
e- Stabilité et stabilisation des aluns basiques.

Les solutions d'alun basique sont relativement instables et les produits d'hydrolyses insolubles apparaissent après une période allant de quelques heures à quelques mois dépendant de la méthode, des conditions de préparation, de la température de conservation et aussi de l'effet catalytique des sulfates.

Leur stabilité restreinte a motivé de nombreux efforts pour identifier des méthodes de stabilisation de ces composants.

Des travaux tout à fait récents ont par ailleurs conduit à la mise au point d'un nouvel alun basique stabilisé par incorporation de silicate (HAESE & SPIRATOS - 1988).

Ce produit désigné PASS "Polyaluminium- silico-sulfate" peut être préparé selon la formule générique suivante :



Selon des données expérimentales actuellement disponibles, le silicate serait incorporé dans les espèces polymériques, augmentant ainsi la stabilité des solutions concentrées d'alun basique.

Une solution de PASS, ($r=1,5$), contenant l'équivalent de 8 à 9% de Al_2O_3 ne montre aucun signe de précipitation après 3 mois à la température ambiante.

II- PRESENTATION DE LA RETENUE DE KEDDARA ET DE L'USINE DE TRAITEMENT DE BOUDOUAOU.

1- Retenue de Keddara :

Jusqu'en avril 1987, les eaux souterraines sont restées la seule source de production d'eau potable avant que la capitale ne soit renforcée par la mobilisation d'une quantité supplémentaire d'eau en provenance des oueds Isser et Keddara.

Le barrage de Keddara est situé sur le territoire de la wilaya de Boumerdès, à 8 km au sud de la localité de Boudouaou et à 40 km à l'est d'Alger.

Ce barrage est alimenté par l'oued Isser dont les eaux sont emmagasinées au barrage de Beni-Amrane qui a une capacité de stockage de 16 millions de mètres cubes. Le transfert de cette eau vers le barrage de Keddara est assuré par une station de pompage dont la capacité de refoulement est de $7\text{m}^3/\text{s}$.

En plus des eaux de l'oued Isser, le barrage de Keddara, de capacité égale à 145 millions de m^3 , reçoit celles de l'oued Keddara ainsi que le trop plein du barrage Hamiz destiné à l'agriculture.

Le transfert de l'eau du barrage de Keddara vers la station de traitement de Boudouaou se fait gravitairement. (figure 11)

2- L'usine de traitement de Boudouaou.

La station de traitement des eaux potables se situe à 3 km environ au sud de la ville de Boudouaou.

Avec une capacité de production maximale de 540 000 m^3/jour , elle constitue un ouvrage essentiel dans la chaîne de production d'eau à partir des eaux de surface.

Ce débit journalier maximum ne peut être produit actuellement en raison de la quantité d'eau insuffisante provenant du barrage.

Une production de 300 000 m^3/j en moyenne est réalisée. Elle permet la préservation de l'eau au niveau du barrage durant toute l'année.

Par son processus de traitement approprié, elle élimine tous les éléments indésirables contenus dans l'eau brute. Cela se matérialise par l'injection de produits chimiques dans l'eau selon un protocole de différentes phases de traitement : (voir diagramme fonctionnel de la station).

a- *L'aération* : Elle sert à oxyder certains éléments tels que métaux, les matières organiques d'une part, et conférer à l'eau un goût agréable d'autre part.

b- *La préchloration* : Sert à éliminer les matières organiques et l'ammoniaque contenus dans l'eau.

c- *La coagulation-floculation* : Sert à agglomérer les matières colloïdales contenues dans l'eau par la formation de floes.

d- *La décantation (Clarification)* : Sert à faire précipiter les floes au fond des décanteurs.

e- *La filtration* : Sert à éliminer les matières encore en suspension dans l'eau.

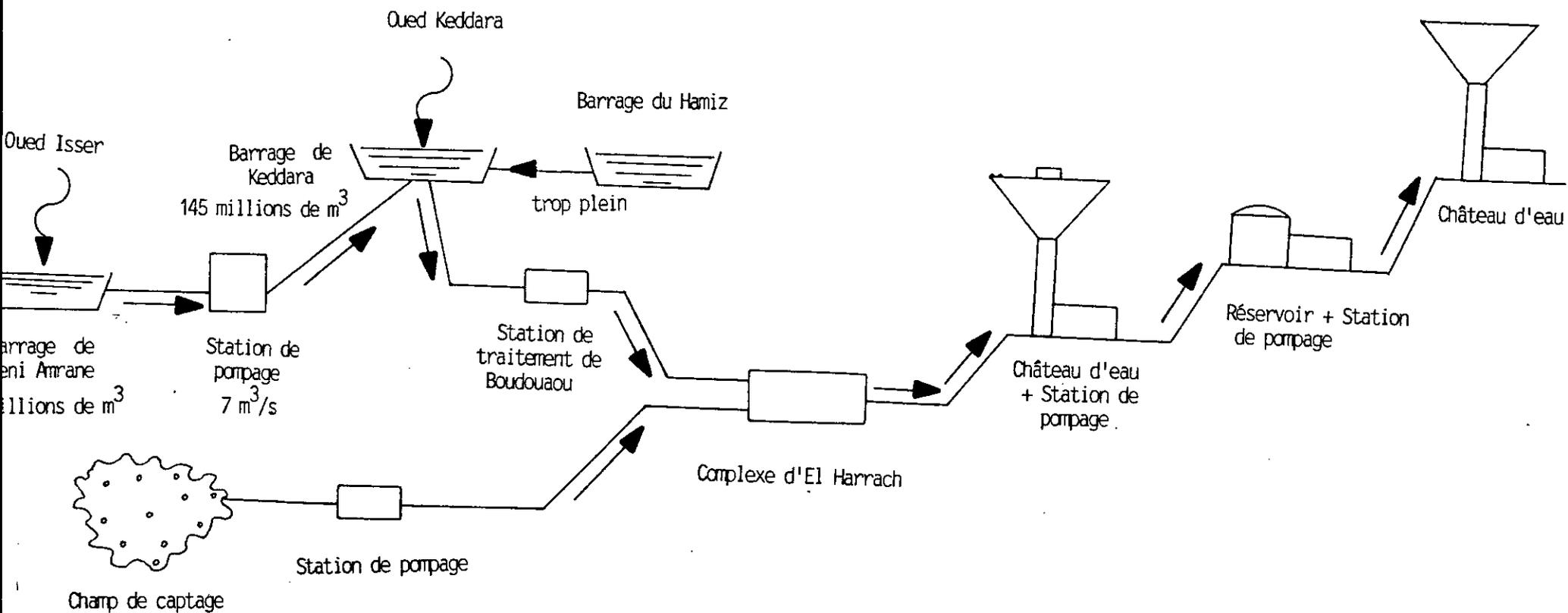


Figure 11: Transfert de l'eau

f- *La désinfection* : Sert à détruire les bactéries et germes contenus dans l'eau.

g- *La neutralisation* : Sert à protéger les conduites contre l'agressivité et/ou l'entartrage.

IV- MATERIEL ET METHODE.

A- PRELEVEMENT :

1- *Barrage de Keddara* : L'échantillon d'eau du barrage de Keddara est prélevé au niveau du laboratoire par le robinet d'arrivée, et est utilisé après homogénéisation.

2- *Rivière Ste Yacinthe* : L'eau est prélevée au même endroit et à la même profondeur directement de la rivière. Elle est conservée à 5°C et homogénéisée avant chaque test.

3 - *Caractéristiques physico-chimiques des 2 eaux :*

	Eau de Boudouaou-Keddara.	Eau de la rivière Ste Yacinthe.
TEMPERATURE.	12 à 15 °C.	14°C.
pH .	7,97 à 8,03.	7,00 à 7,10.
TURBIDITE.	6 NTU.	20 à 22 NTU.
m.o.	2,0 à 2,6 mg O ₂ /l.	8,3 à 9,8 mg O ₂ /l.
TAC.	144 mg/l CaCO ₃ .	66 à 70 mg/l CaCO ₃ .
ABSORBANCE à λ max.	0,038 à 0,040.	0,20 à 0,46.

IT

B- MATERIEL :

* *Appareils* :

- Flocculateur : appareil à 6 agitateurs mécaniques à vitesse variable, muni chacun d'un béccher d'un litre.
- Turbidimètre H-2000 .
- PH-METRE.
- Spectrophotomètre.
- Echelle de couleur , en unité Hazen.
- Analyseur de COT. BECKMAN - 915.
- Pompe péristaltique à vitesse variable.

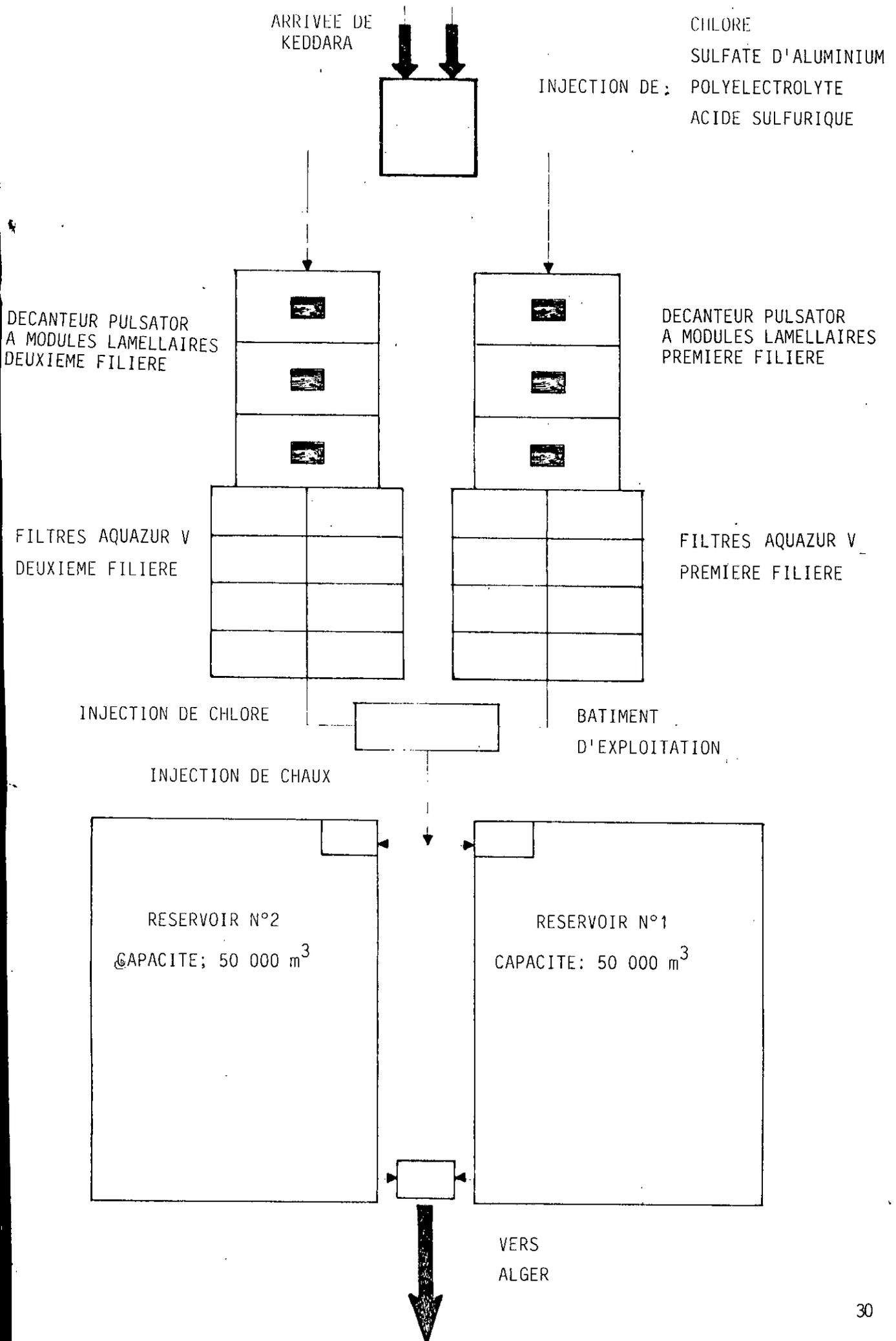


Figure 12: Diagramme fonctionnel de la station de traitement de Boudouaou

- Agitateur.

* *Petit matériel :*

- Becher, pipettes, burettes, tubes Nesler, thermomètre, bouteilles identiques en PVC.
- siphon.
- Jerricanes.

* *Réactifs utilisés :*

EAU DE BOUDOUAOU.

EAU DE STE YACINTHE.

$Al_2((SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$. M= 666,41 g/mole.

$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$. Dr= 1,33 g/ml
47,4 mg d'Al +++/ml.

$AlCl_3 \cdot 6H_2O$. M= 241,43 g/mole.

$AlCl_3 \cdot 6H_2O$. M=241,43 g/mole

$FeCl_3 \cdot 6H_2O$. 270,30 g/mole

$FeCl_3$: Dr=1,33 g/ml
10,96 g Fe+++/100 g de solution

PASS: Dr= 1,252 g/ml
46,8 mg d'Al+++/ml

PASS: Dr= 1,252 g/ml
46,8 mg d'AL+++/ml

PCBA, PSBA, PCBF,

PCBA, PCBF

Polyélectrolyte cationique
FO 4115 PWG.
Sol. mère 1g/l.

Polyélectrolyte cationique:
Solution mère: 2,4 g/l

C- METHODE.

1- Le jar- test :

Ou test de coagulation-floculation Réalisé avec le flocculateur. Les essais sont effectués dans les conditions suivantes:

- Une phase de forte agitation de 2 minutes sous une vitesse de rotation de 200 tours/mn où l'on injecte rapidement et simultanément les doses croissantes de coagulant dans les 6 bâteaux .
 - Une deuxième phase où la vitesse de rotation est maintenue à 40 tours /mn durant 20 minutes favorisant la floculation.
 - Une phase de décantation du liquide pendant 40 minutes pour l'eau de Keddara et 30 min pour les eaux de Ste Yacinthe en raison de charge.
- L'eau décantée subit l'évaluation des paramètres suivants :

- . turbidité,
- . pH,
- . couleur,
- . TAC,
- . mo,

. Al ou Fe résiduels,
. COT, COD.

Une fois la dose optimale de coagulant fixée, on répète le jar-test en l'injectant cette fois-ci dans les 6 bechers suivies 30 s plus tard d'une série croissante de dosage en polyélectrolyte. On détermine ainsi la dose optimale de floculant. Les résultats obtenus seront représentés sous forme de courbes donnant l'évolution du paramètre considéré en fonction du dosage de coagulant en meq/l ou en mg/l de polyélectrolyte.

2- Mesure de turbidité :

Première analyse à effectuer à la suite du siphonnage de l'eau décantée. L'appareil utilisé est un turbidimètre HACH 2000. Son principe d'action est de mesure par cellule photoélectrique la diffraction d'un faisceau lumineux par les matières en suspension. C'est la méthode la plus sensible.

3- Mesure du pH :

Méthode potentiométrique. Principe : La différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence (Calomel-KCl saturé) plongeant dans une même solution est une fonction linéaire du pH de celle-ci. La température a une influence sur la mesure.

4- Mesure du TAC :

Titre alcalimétrique complet. Le TAC mesure l'ensemble des anions faibles, à savoir les hydroxydes (OH^-), carbonates (CO_3^{2-}), hydrogencarbonates (HCO_3^-) et silicates (HSiO_3^-).

Principe d'action : Il s'agit d'un dosage acide fort (dans notre cas, l'acide sulfurique) - base faible.

Le dosage est terminé lorsque le pH de l'échantillon atteint 4,4..

Cette mesure se fait par électrode et PH-METRE ou par l'emploi d'un indicateur coloré (méthylorange).

5- Mesure du degré de couleur :

Elle est faite par 2 méthodes différentes :

Première méthode comparimétrique : Se fait par comparaison de la couleur de l'échantillon avec une échelle artificielle de couleur. Le substance de référence choisie est le chloroplatine de potassium dans une solution de chlorure de cobalt (CoCl_2). Ce mélange a été proposé par Hazen en 1922.(28). Dans notre cas nous avons utilisé des disques en platine calibré en unité de couleur.

L'unité de couleur "Hazen" correspond à 1mg/l de platine sous forme de K_2PtCl_6 .(28).

Deuxième méthode : Se fait par mesure de l'absorbance de notre échantillon à une longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption déterminé préalablement par balayage de spectre. (Le degré de couleur final étant exprimé par la baisse relative de l'absorbance).

Par la suite, nous avons fait correspondre l'unité "Hazen" à l'absorbance enregistrée à λ max. partant d'une eau brute colorée à 70 U.H. et diluée avec de l'eau distillée de façon à obtenir une échelle allant de 5 U.H à 70 U.H.

6- Mesure de l'Al et du Fe résiduels :

- *Mesure du Fe* : Par méthode spectrométrique à la phénantroline 1,10 (ou orthophénantroline).

Principe d'action : Formation d'un complexe rouge-orangé, en milieu tamponné entre le Fe, maintenu ou amené à l'état de FeII et la phénantroline. Mesure spectrométrique à une longueur d'onde de 510 nm.

- *Mesure de l'Al* : Par méthode spectrophotométrique. Mesure de l'absorbance à 535 nm d'un complexe avec l'eriochrome cyanine R. L'interférence du Fe et du Mn (Manganèse) est éliminée par l'acide ascorbique.

7- Mesure de l'oxydabilité au $KMnO_4$:

Méthode de mesure : AFNOR T90. 018.

Principe d'action : Le permanganate de potassium introduit en excès dans l'eau est en partie réduit par les matières oxydables qu'elle contient. Cette réduction s'effectue à température d'ébullition en milieu acide. L'excès de permanganate est dosé par le sulfate du Fe et d'ammonium dont on a au préalable mesuré le pouvoir réducteur sur le permanganate. (27,29).

8- Mesure du COT et du COD :

a- *Mesure du COT* :

Principe d'action : Le principe de mesure de ce paramètre (COT) est basé sur l'oxydation des matières organiques. L'analyse du CO_2 formé est alors réalisée de manière quantitative et le résultat est exprimé en mg de carbone /l.

Il est donc nécessaire de pouvoir distinguer :

- Le gaz carbonique provenant effectivement de l'oxydation des matières organiques;
- le gaz carbonique présent à l'état dissout dans l'échantillon,
- le carbone minéral présent sous forme de carbonate et de bicarbonate.

C'est pourquoi on définit généralement :

- Le carbone total.
- Le carbone minéral ($HCO_3^- + CO_3^{--}$).
- Le carbone organique.

b- *Mesure du COD* : (carbone organique dissout).

Le COD est recherché selon le même principe que le COT après filtration de l'échantillon.

Conception de l'analyseur de carbone utilisé :

La mesure du COT est une mesure indirecte en 2 phases :

- La première prend en compte le carbone total (combustion à $950^\circ C$).
- La seconde ne prend en considération que le carbone minéral. Celui-ci étant transformé en CO_2 par acidification de l'échantillon.

On a alors :

$$\text{COT} = \text{C total} - \text{C minéral} .$$

Le système de détection du CO₂ formé se fait à base d'infrarouge (absorption par le gaz carbonique de la bande IR à 4,4 μm). L'intensité de l'absorption étant proportionnelle à la concentration de CO₂.

9- Préparation des solutions coagulantes :

a- PCBA :

Polychlorure basique d'aluminium.

Dans une fiole jaugée de 250 ml , on verse 50 ml de la solution mère de AlCl₃ 0,5 M.

A défaut d'un bain thermostaté, nous plaçons la fiole dans un récipient rempli d'eau à 20°C. Un contrôle régulier au thermomètre est effectué avec, chaque fois, ajout d'eau tiède afin de maintenir une température voisine de 20°C.

Sous une agitation de 250 tr/mn, (un agitateur à barreau magnétique a été utilisé à cette fin), nous ajoutons de la soude 0,5 N, à raison de :

$$0,05 \text{ OH}^-/\text{Al}/\text{mn.} = \text{environ } 125 \text{ ml/h,}$$

jusqu'à obtention du rapport : $r = \text{OH}^- / \text{Al} = 2,5$:

Soit une quantité de 124 ml NaOH complétée par 250 ml d'eau distillée puis laissée à maturer pendant 1 heure avant tout essai.

b- PSBA :

Polysulfate basique de l'aluminium.

Le principe de préparation est le même que précédemment.

Le rapport : $r = \text{OH}^- / \text{Al} = 1,5$, est optimum.

La quantité : NaOH 0,5N = 75 ml.

c- PCBF :

Polychlorure basique de fer.

L'ajout de NaOH se fait sur la chlorure de fer FeCl₃·6H₂O (0,5N).

Le rapport optimal : $r = \text{OH}^- / \text{Fe} = 2$,

D'où : NaOH 0,5N = 100 ml.

L'ajout de la solution de soude se fait à raison de 125 ml/h pour chacune des 3 préparations. Une pompe péristaltique à vitesse variable est utilisée à cet effet.

Remarque :

Le choix de la méthode de préparation est fixé à partir de résultats de travaux antérieurs (17, 48, 87,2)

10- Méthode d'interprétation des résultats par le diagramme d'Amirtharajah.

AMIRTHARAJAH (9, 25) a proposé un diagramme, (utilisé dans cette étude), qui permet de prédire le mécanisme indiqué en fonction de pH et de la dose d'alun ou, inversement, de choisir une zone de dosage convenable :

- Pour des dosages de 20 à 50 mg/l et un pH final compris entre 6,8 et 8,2, c'est la voie F qui l'emporte avec balayage ou "sweep flocculation".

- Pour des dosages plus faibles, et des pH plus bas, c'est la voie E (compression- neutralisation, adsorption) qui est prépondérante et, si la dose augmente, on tombe dans la zone de restabilisation.

V- RESULTATS - DISCUSSION.

1-Résultats des tests effectués conjointement sur l'eau de Keddara et celle de la rivière Ste Yacinthe.

Remarque : Pour les paragraphes qui suivent,

"-" = Observation.

"*" = Interprétation

A- TURBIDITE .

- Barrage Keddara :

Les graphes 1 et 2 représentent l'évolution de la turbidité résiduelle et son pourcentage d'élimination en fonction du dosage.

OBSERVATIONS :

- L'allure des courbes sur le graphe 1, fait apparaître 3 zones distinctes :

. Une première zone décroissante, où la turbidité décroît proportionnellement à la dose croissante.

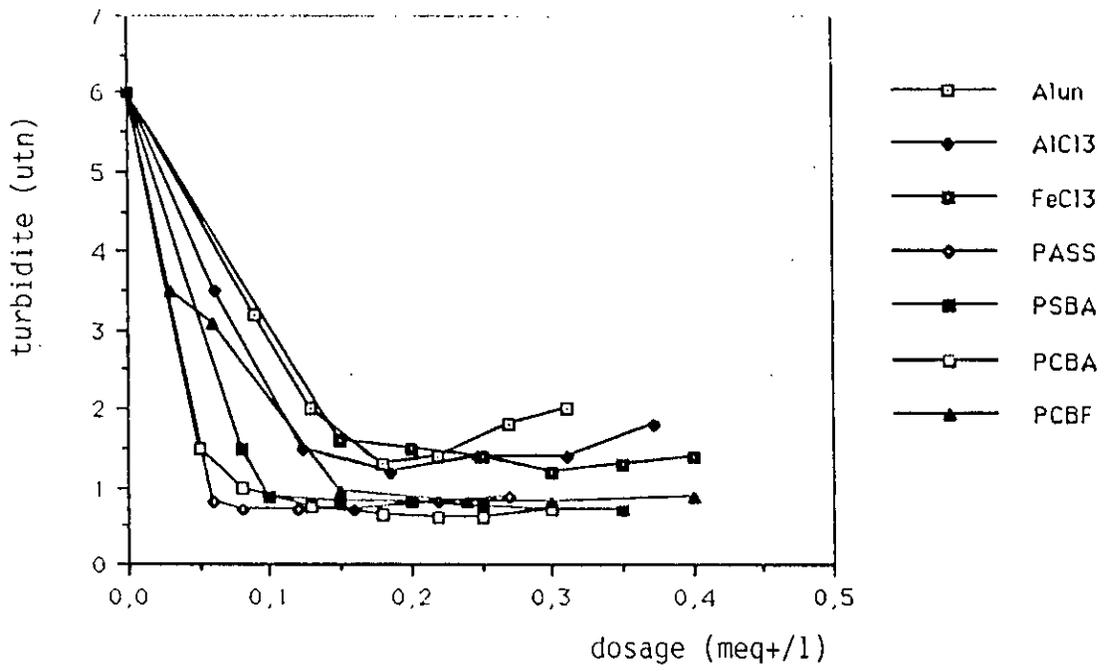
. Une zone creuse représentant l'intervalle de dosage où la turbidité est minimale donnant la dose optimale de coagulant.

. Une troisième zone où la turbidité de l'eau commence à croître à partir d'une dose limite (dose optimale) indiquant un surdosage menant à une inversion des charges et donc à une restabilisation des particules colloïdales.

Cette dernière phase s'accroît avec l'utilisation des sels de métaux (Alun, $AlCl_3$, $FeCl_3$), alors que les polymères basiques maintiennent la turbidité minimale sur une large plage de dosage.

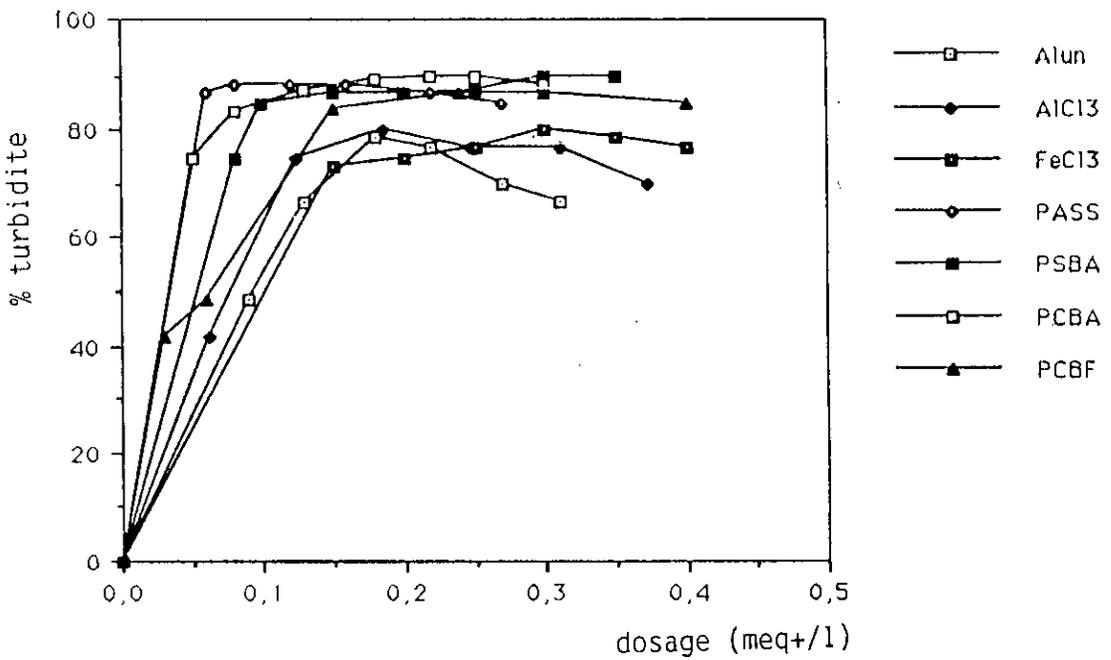
Tableau 1: "Dosage des différents coagulants pour une même turbidité résiduelle, soit 1,5 UTN."

COAGULANT.	TURBIDITE RES.	DOSAGE REQUIS meq+/l.	DOSAGE REQUIS mg/l de sel métallique.
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	1,5	0,150	16,66
$AlCl_3$	1,5	0,124	9,97
$FeCl_3$	1,5	0,200	15,31
PSBA	1,5	0,080	8,88
PCBA	1,5	0,050	4,02



Graphe N°1

Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)



Graphe N°2

Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)

PCBF	1,5	0,088	7,12
PASS	1,5	0,042	4,66

(TABLEAU 1).

- Du tableau 1 sont déduits les rapports suivants :

- . $AlCl_3 / PCBA = 0,124 / 0,05 = 2,48.$
- . $Alun / PSBA = 0,15 / 0,08 = 1,87.$
- . $Alun / PASS = 0,15 / 0,042 = 3,57.$
- . $FeCl_3 / PCBF = 0,2 / 0,088 = 2,27$

Il apparaît que pour une même turbidité finale, les doses requises en Al ou Fe utilisant les polymères basiques sont de 2 à 3 fois moindres que celles requises avec les sels métalliques d'origine.

- Une meilleure élimination de turbidité (< 1 NTU) est réalisée avec les polymères basiques, pour des valeurs de dosage inférieures en charges positives. Une moyenne de 1,4 NTU étant atteinte avec les sels de métaux.

Du graphe 2, on déduit le tableau 2:

Tableau 2: " Pourcentages d'élimination optimaux de turbidité et leurs dosages correspondants."

COAGULANT.	% OPTIMAL DE TURBIDITE ELIMINEE.	DOSAGE REQUIS.
Alun	78,40	0,18
AlCl ₃	80,00	0,18
FeCl ₃	80,00	0,30
PSBA	86,70 à 90,00	0,20 à 0,30
PCBA	87,50 à 89,16	0,13 à 0,18
PCBF	86,70	0,24
PASS	88,40	0,22

(TABLEAU 2)

- Concernant les dérivés de Fe, la performance du FeCl₃ est analogue à celle de l'alun et du AlCl₃. Cependant pour une même turbidité finale, la dose de Fe est plus grande que celle de l'Al.

Soit pour une turbidité résiduelle = 1,5 :

$$0,2 \text{ meq+l de } Fe^{3+} \text{ pour } FeCl_3 = 0,2 \times 270,30 / 3 = 18,02 \text{ mg/l .}$$

$$0,17 \text{ meq+l de } Al^{3+} \text{ pour l'Alun} = 0,17 \times 666,41 / 6 = 18,80 \text{ mg/l}$$

On remarque qu'à poids égal en FeCl₃ et Alun, FeCl₃ contient plus de charges positives que le sulfate d'Al.

- Utilisation du polyélectrolyte comme adjuvant :

Les graphes 3 et 4 donnent l'évolution de la turbidité résiduelle et le pourcentage de turbidité éliminée en fonction de la dose croissante de polyélectrolytes en mg/l ajoutés 30 s après l'injection de la dose optimale de coagulant. Des graphes 3 et 4, est déduit le tableau 3:

Tableau 3: "Valeurs optimales de turbidité résiduelles atteintes après ajout de polyélectrolyte."

COAGULANT	DOSE OPTIMALE. meq+/l	DOSE OPTIMALE. mg/l	DOSE OPT. POLYELEC- TROPOLYTE. mg/l	TURBIDITE FINALE. NTU	% ELIMINAT. TURBIDITE.
Alun	0,180	20,00	0,10	0,85	85,83
AlCl ₃	0,186	14,96	0,10	0,90	85,00
FeCl ₃	0,300	18,02	0,15	0,90	85,00

(TABLEAU 3.)

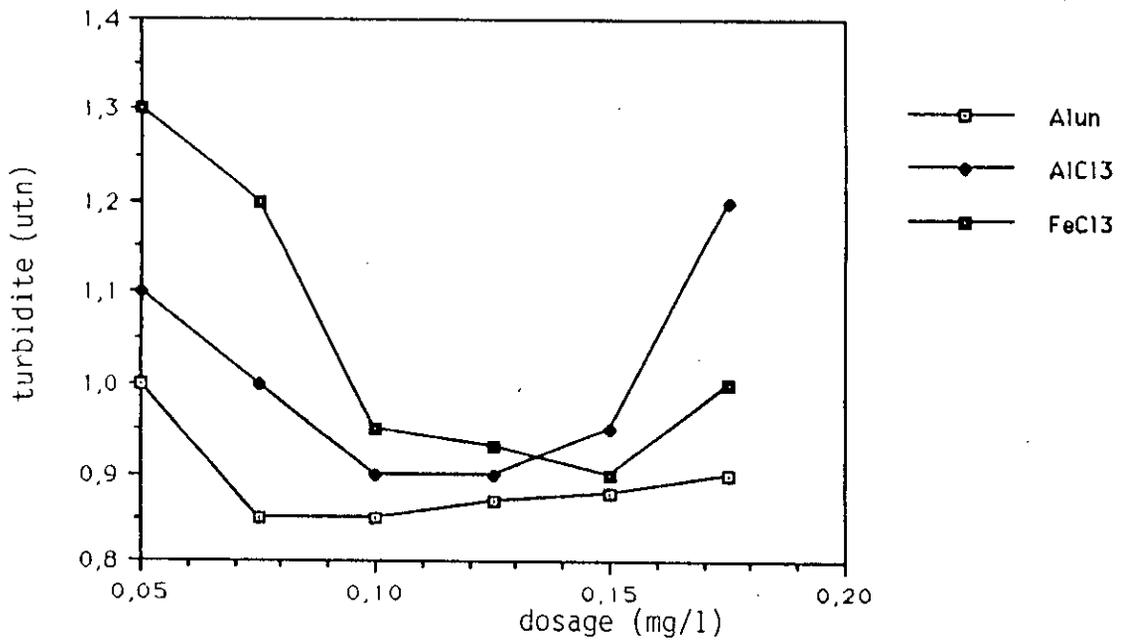
- L'objectif du traitement est d'atteindre une turbidité inférieure à 1 NTU. Avec les sels de métaux, cette valeur est atteinte par l'ajout de polyélectrolyte.
- Avec les polymères basiques, l'ajout de polyélectrolyte n'est pas nécessaire et le pourcentage d'élimination de la turbidité est plus élevé même à faible dosage.
- L'ajout de polyélectrolyte sur les sels de métaux améliore le temps de décantation en alourdissant le floc.
- Avec les polymères basiques, on aboutit à la formation de floccs facilement décantables bien qu'ils soient de petite taille.

- Rivière Ste Yacinthe :

Les graphes 5 et 6 représentent l'évolution de la turbidité et le pourcentage de son élimination en fonction du dosage.

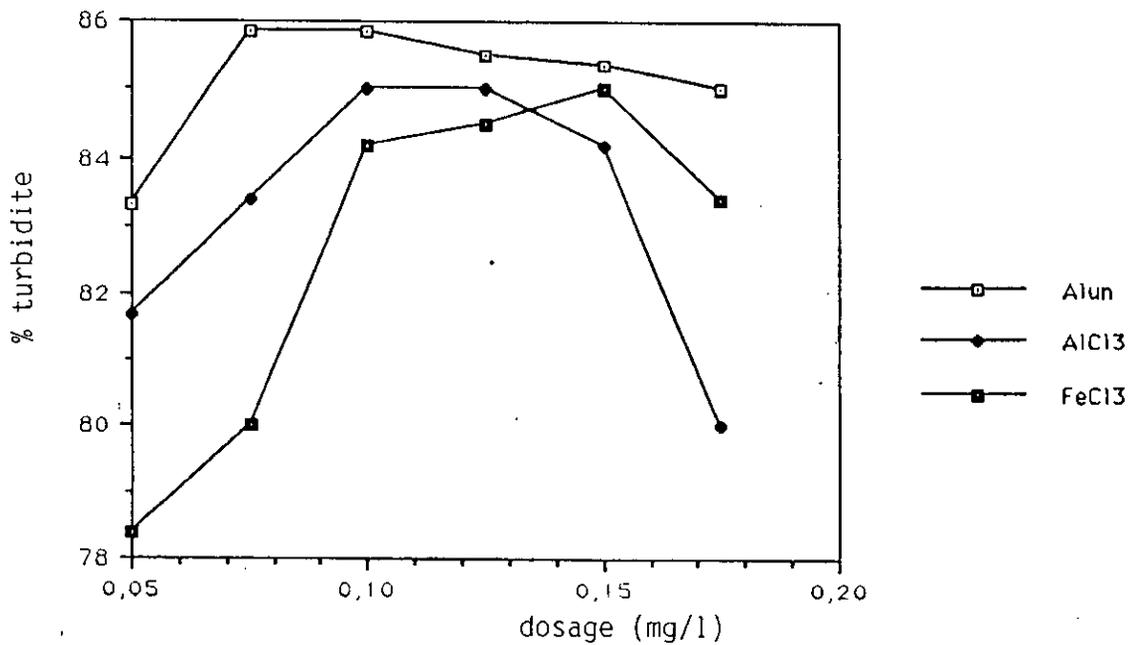
OBSERVATIONS :

- La baisse de turbidité se fait efficacement sur une plage de dosage restreinte concernant l'Alun, AlCl₃ et Fe Cl₃.
- Les polymères basiques maintiennent une turbidité minimale plus petite sur une large plage de dosage.
- Le restabilisation est plus prononcée avec les sels de métaux par rapport à celle observée sur l'eau du barrage Keddara.



Graphe N°3

Evolution de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte
(Barrage de Keddara)



Graphe N°4

Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte
(Barrage de Keddara)

- La turbidité de l'eau décantée atteint des valeurs inférieures à 1 NTU aussi bien avec les polymères basiques qu'avec les sels de métaux sans ajout de polyélectrolyte.

Tableau 4: "Dosage des différents coagulants pour une même turbidité résiduelle."

COAGULANT.	TURBIDITE FINALE. NTU.	DOSE DE COAGULANT. mcq+/l.
Alun	0,7	0,470
AlCl ₃	0,7	0,500
FeCl ₃	0,7	0,808
PASS	0,7	0,470
PCBA	0,7	0,360
PCBF	0,7	1,200

(TABLEAU 4)

Soit les rapports déduits:

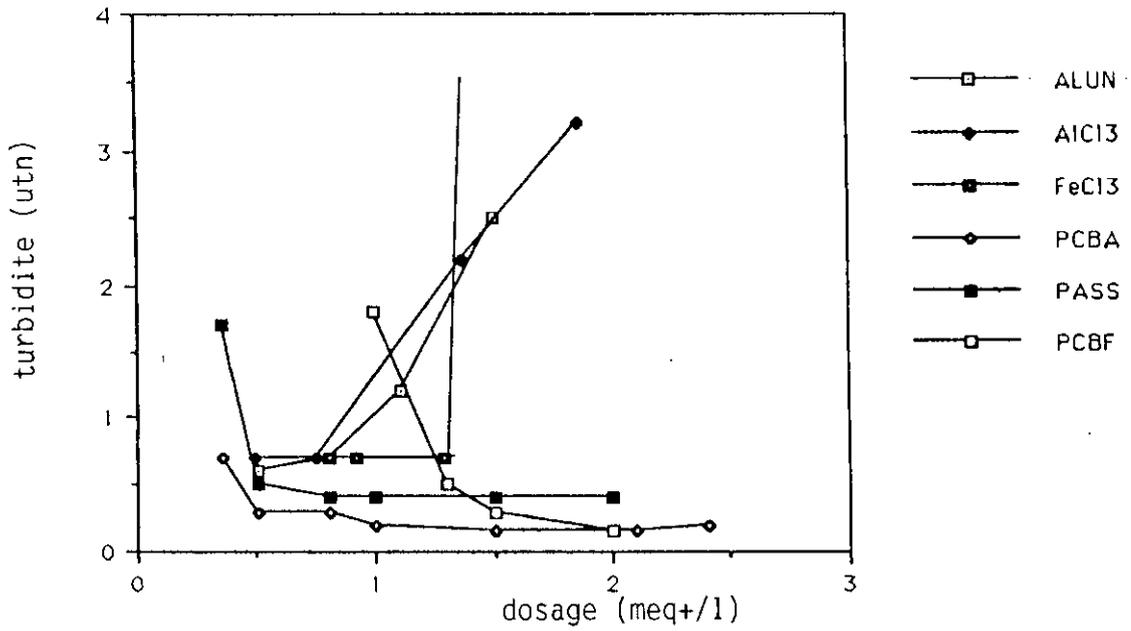
$$\begin{aligned} \text{Alun/PASS} &= 0,47/0,47 = 1 & \text{Alun/PCBA} &= 0,47/0,36 = 1,30. \\ \text{AlCl}_3/\text{PCBA} &= 0,5/0,36 = 1,38. & \text{AlCl}_3/\text{PASS} &= 0,5/0,47 = 1,06. \\ \text{FeCl}_3/\text{PCBF} &= 0,808/1,2 = 0,67. \end{aligned}$$

La différence de dosage en élément Al ou Fe entre les deux types de coagulant (qui était 2 à 3 fois moindre avec les aluns basiques sur l'eau de Keddara) devient moins importante sur l'eau chargée de Ste-Yacinthe. Elle donne, pour une même efficacité, des dosages en Al sensiblement égaux.
- Le PCBF réagit d'une manière plus efficace que FeCl₃ mais à des doses plus élevées.

Du graphe 6, est déduit le tableau 5:

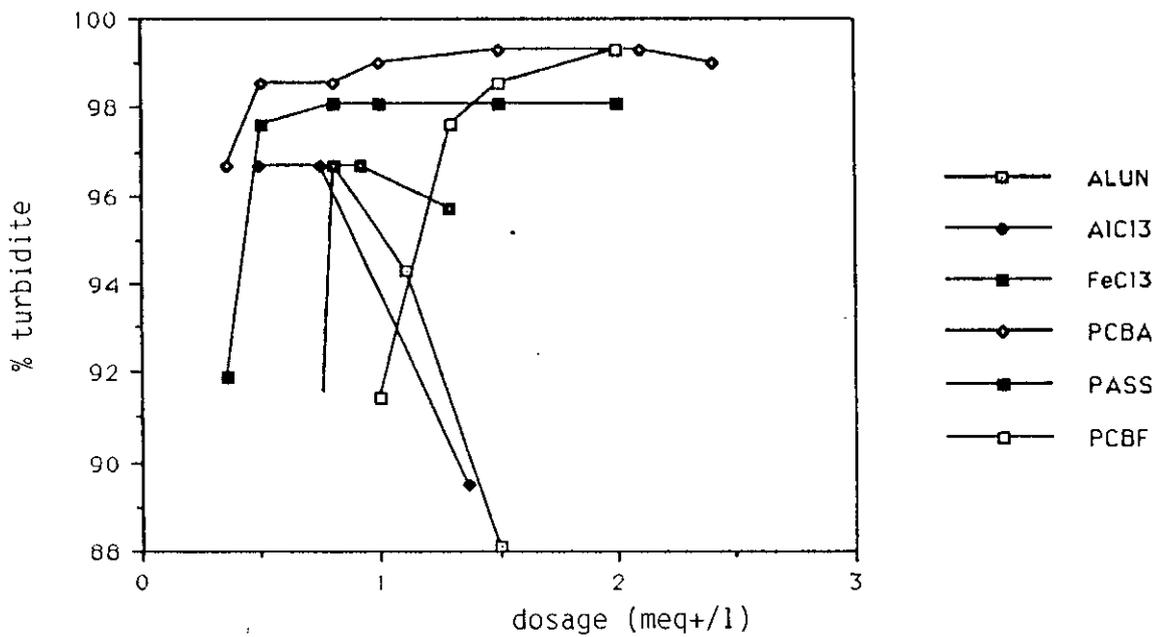
Tableau 5: "Pourcentages d'élimination optimaux de turbidité et leurs dosages correspondants."

COAGULANT.	% OPTIMAL DE TURBIDITE ELIMINEE.	DOSAGE . mcq+/l.
Alun	97,14	0,505
AlCl ₃	96,70	0,550
FeCl ₃	96,70	0,808
PCBA	99,28	1,500



Graphe N°5

Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)



Graphe N°6

Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)

PCBF	99,28	2,000
PASS	98,09	0,808

(TABLEAU 5.)

Bien que les sels de métaux donnent une aussi bonne élimination de turbidité que les polymères basiques, pour des doses supérieures l'utilisation de ces derniers améliorent le rendement.

- Utilisation de polyélectrolyte comme adjuvant :

Les graphes 7 et 8 représentent l'évolution et le pourcentage de la turbidité en fonction de la dose croissante de polyélectrolyte exprimée en mg/l. Le tableau 6 en est déduit:

Tableau 6: "Valeurs optimales de turbidité résiduelles atteintes après ajout de polyélectrolyte."

COAGUL.	D. Opt. meq+/l	Turb. NTU.	% Turb. éliminée.	D. Opt. de polyélect	Turb. finale.	% Turb. éliminée.
Alun	0,505	0,7	96,70	0,312	0,45	97,85
AlCl3	0,750	0,7	96,70	0,312	0,40	98,09
FeCl3	0,923	0,7	96,70	0,240	0,50	97,61
PASS	0,808	0,4	98,09	0,432	0,40	98,09

(TABLEAU 6.)

L'ajout de polyélectrolyte aux sels de métaux améliore légèrement la turbidité de l'eau décantée mais n'a aucune influence sur le traitement au PASS.

- Les floes formés décantent plus rapidement après ajout de polyélectrolyte sur les sels de métaux.

L'ajout de polyélectrolyte au PASS ne provoque aucun changement sur l'aspect des floes formés ni sur leur décantation.

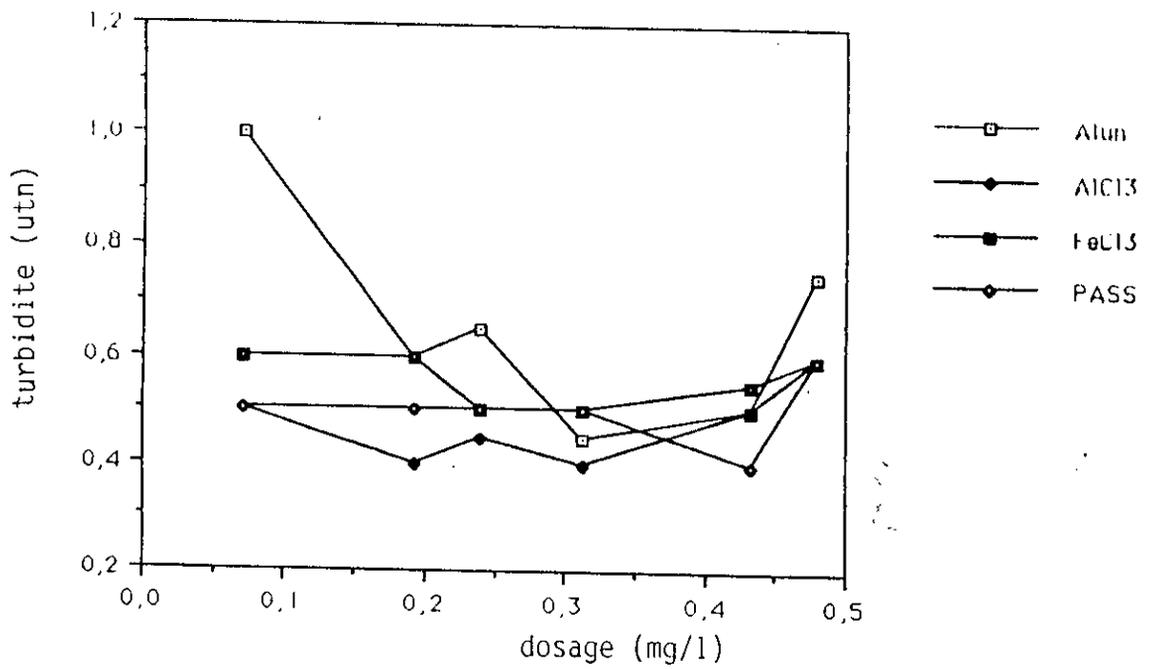
COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR LES 2 EAUX :

1° POINTS COMMUNS :

- Les sels de métaux donnent une turbidité minimale sur une plage de dosage restreinte.

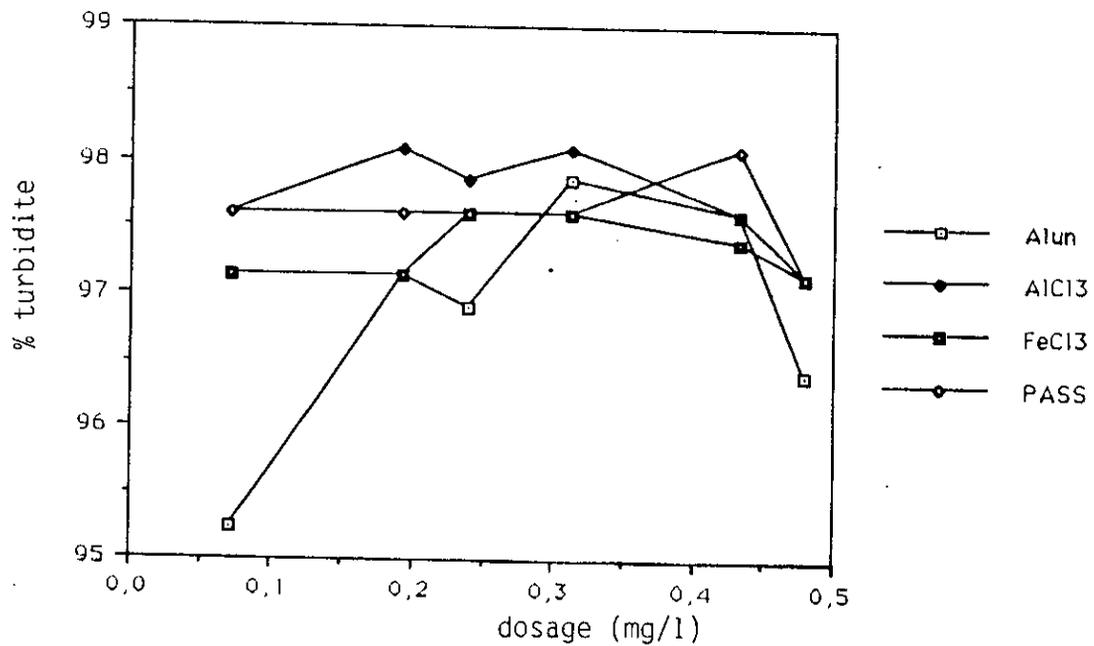
- Les polymères d'Al et de Fe agissent sur une large plage de dosage en faisant diminuer plus efficacement la turbidité sans intervention de polyélectrolyte.

- Avec les sels de métaux l'ajout de polyélectrolyte alourdit le floe et améliore le temps de décantation.



Graphe N°7

Evolution de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte (Rivière Sainte Yacinthe)



Graphe N°8

Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte (Rivière Sainte Yacinthe)

2° DIFFERENCES :

- Le traitement avec les sels de métaux donne :

Turbidité finale	(1 NTU.	_____	Eau décantée de Ste Yacinthe.
"	"	moy. = 1,4	" " " Keddara.

- En utilisant les polymères basiques, le traitement de l'eau de Keddara exige un dosage requis en charge positive diminué de 1/2 à 2/3.

- Sur l'eau de Ste Yacinthe, le dosage requis en charge positive avec les aluns basiques est diminué de 3/10.

- Le traitement avec les dérivés du Fe est plus efficace sur l'eau du barrage Keddara que sur celle de Ste Yacinthe.

- L'ajout de polyélectrolyte comme adjuvant améliore l'élimination de la turbidité d'une moyenne de 80 à 85% sur l'eau de Keddara . Sur l'eau de Ste-Yacinthe, la réduction passe d'une moyenne de 96,7 à 97,85 %

INTERPRETATIONS :

Concernant les dérivés d'Al :

* *L'eau du barrage Keddara* est très faiblement chargée. Le dosage requis est de 20 mg/l de sulfate d'Alun. Valeur qui réduit le pH à 7,4 .

. Dans ces conditions et en référence au diagramme d'AMIRTHARAJAH, on se retrouve à l'intérieur de la zone où le mécanisme prépondérant est celui de "sweep coagulation" :

Avec les sels de métaux, ce mécanisme est amorcé par la présence d'une forte teneur en matières en suspension colloïdale qui jouent le rôle de noyau dans la formation de l'hydroxyde final $Me(OH)_3$, $M = Fe$ ou Al).

Vu la faible turbidité, le traitement avec les sels de métaux s'annonce difficilement et donc celle du floc, et la turbidité minimale atteinte est supérieure à 1 NTU. et exige l'ajout de polyélectrolyte pour atteindre une valeur inférieure à 1 NTU.

* Les polymères basiques présentent de fortes charges positives et centres actifs ; agissent par compression adsorption neutralisation et pontage. Ce mécanisme n'a pas besoin de turbidité pour être amorcé son action déstabilisante et floculante en même temps, d'où son efficacité accrue sur l'eau peu turbide de Keddara.

* *L'eau de la rivière Ste-Yacinthe* est une eau chargée, peu alcaline. Son pH est de 7.

Le traitement optimal avec les sels de métaux exige une dose de :

(0,5-0,8)meq+/l , avec l'Alun. = (50-80) mg/l.
(0,5-0,8)meq+/l , avec $AlCl_3$ = (40,23-60,35) mg/l.

La première et la deuxième valeur de l'intervalle représentent respectivement les doses optimales d'enlèvement de turbidité et de couleur.

Les pH finaux des solutions sont respectivement:

(6,4 - 6,1) , avec l'Alun.
(6,2 - 5,8) , avec $AlCl_3$.

Ces conditions de dosage et de pH nous ramènent toujours à la zone de "sweep coagulation".

L'eau de Ste Yacinthe étant turbide, une nette amélioration du déroulement de ce mécanisme avec les sels de métaux est observée (par rapport à celui observé sur l'eau de Keddara) :

. Formation de plus gros flocons et par conséquent une décantation plus rapide.

. Une turbidité finale inférieure à 1 NTU.

* La restabilisation des colloïdes avec les sels de métaux est plus accentuée sur l'eau de Ste Yacinthe. En référence au diagramme d'AMIRTHARAJAH, ceci est dû à la baisse du pH :

pH = 5 , pour un dosage de 1,3 meq/l .

pH = 4 , " " ") 1,3 meq/l .

On se retrouve dans ces conditions dans la zone de restabilisation où l'Al est sous forme soluble.

* Les polymères basiques agissent toujours selon le même mécanisme.

Dans l'eau chargée de Ste Yacinthe, leur performance vis à vis des sels d'origine diminue. Ceci peut être expliqué par le phénomène d'encombrement stérique qui signifie blocage des centres actifs par les colloïdes nombreux et par conséquent un dosage relativement élevé est observé.

Concernant les dérivés du Fe:

* Sur le diagramme d'AMIRTHARAJAH concernant le chlorure de Fe, on remarque que le dosage n'a pas une influence majeure sur le mécanisme d'action du coagulant et c'est le pH qui joue un rôle essentiel dans la prédiction du mécanisme impliqué dans la coagulation.

** Sur l'eau du barrage Keddara :*

L'emploi optimal de $FeCl_3$ se fait avec une doses de 0,3 meq/l = 27,03 mg/l et pH final correspondant de 7,37.

Ceci nous ramène sur la zone du mécanisme de "sweep coagulation". ce qui explique l'allure de la courbe identique à celle des sels d'Al.

** Sur l'eau de Ste Yacinthe :*

Le dosage optimal requis est de 0,923 meq/l et le pH final est de 5,9. Le mécanisme prévu sur le diagramme est celui d'adsorption déstabilisation. La grande charge du milieu est défavorable à l'optimisation de ce mécanisme pour les raisons suivantes :

. La présence des matières en suspension a tendance à favoriser la formation finale de $Fe(OH)_3$. Celui-ci est solubilisé à pH= 5,9.

. Partant des sels de Fe, la formation des espèces hydrolysées solubles responsables du mécanisme d'adsorption se fait en un temps très court, et se trouvent confrontés à de nombreuses molécules organiques et inorganiques qui induisent un dosage relativement élevé.

* La restabilisation observée avec $FeCl_3$ sur l'eau de Ste Yacinthe à partir de la dose de 1,1 meq/l = 99,11 mg/l et de pH final de 5,4, correspond bien à la zone de restabilisation sur le diagramme.

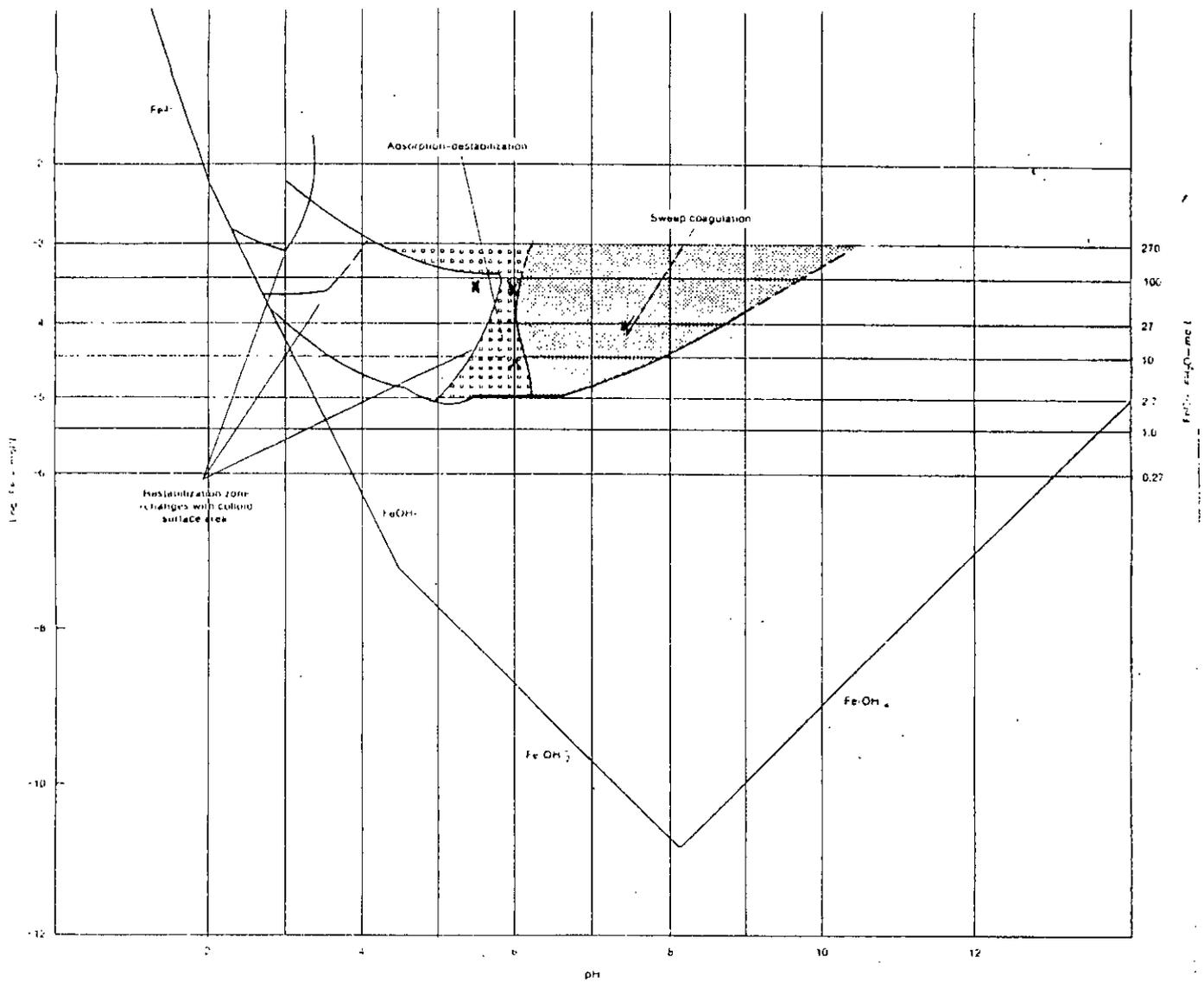


Figure 5. Design-and-operation diagram for Fe(III) coagulation

Figure 14: Diagramme schématique et opérationnel de la coagulation par Fe(III)
 PATRICK.N.Johnson & A.AMIRTHARAJAH. 1983: Ref(25)

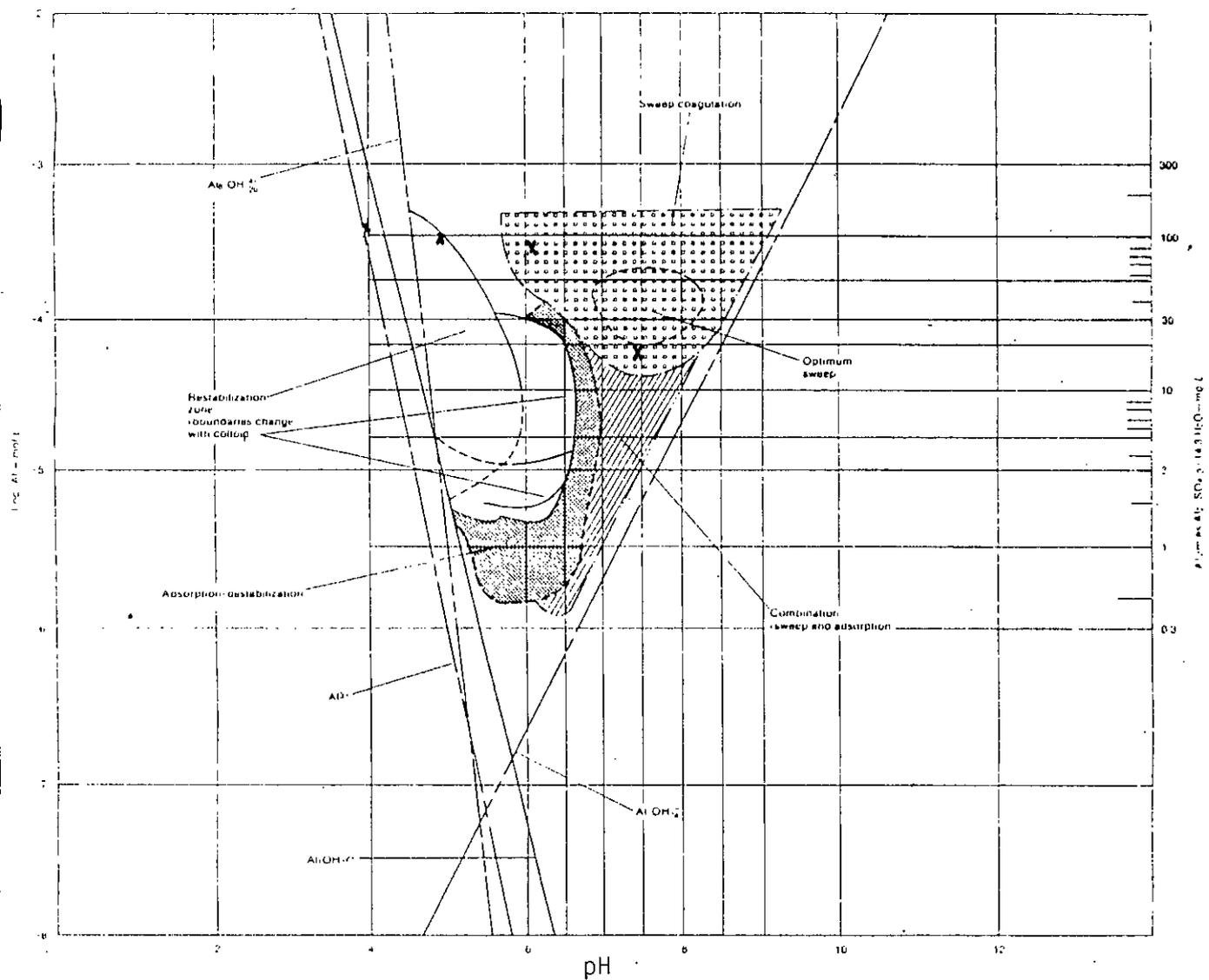


Figure 13: Diagramme schématique et opérationnel de la coagulation par Al(III)
 Amirtharajah 1982: Ref(9,25).

* Le décalage observé entre la dose d'Al et de Fe pour une même efficacité de traitement sur les 2 eaux, est plus important sur l'eau de Ste Yacinthe s'explique par :

. La forte tendance du Fe à former des complexes chimiques avec des substances humiques (3) et a même tendance à se combiner à d'autres substances chimiques pour former des complexes minéraux.

Ces complexes formés sont plus ou moins solubles selon le pH du milieu.

De ce fait une partie du Fe injecté dans l'eau est solubilisé par le pH acide de l'eau de Ste Yacinthe, et un surplus de charge positives par rapport à l'Al est exigé pour obtenir une même efficacité de traitement.

. D'autre part, d'après les travaux sur le Fe de PJ MURPHY et AL (31), les polymères contenus dans la solution coagulante après 1 h de maturation sont des polymères sphériques de 20 Å de diamètre et qui sont les plus efficaces.

Pour $r = OH / Fe = 2$, nous n'obtenons que de petits polymères (d'après JY BOTTERO).

Vu la petite taille des polymères de Fe par rapport aux polymères d'Al, (l'espèce Al_{13} , possède un diamètre de 26 Å), une plus grande dose en polymère de Fe est nécessaire pour atteindre une même efficacité floculante.

B- COULEUR

Barrage Keddara:

Le graphe 11, représente la correspondance entre le degré de couleur en unité Hazen et l'absorbance à la longueur d'onde d'absorption maximale= 373,4 nm, longueur d'onde appartenant au spectre ultra-violet, et qui donc reflète aussi la présence des matières organiques.(33).

Les graphes 9 et 10 représentent l'évolution et le pourcentage de couleur éliminé en fonction du dosage de coagulant.

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

- Sur le graphe 9, l'évolution de la courbe d'enlèvement de la couleur prend une allure semblable à celle de la turbidité. Toutefois, on remarque la différence suivante:

. La dose optimale d'enlèvement de la couleur est supérieure à celle de la turbidité . Cette différence est de:

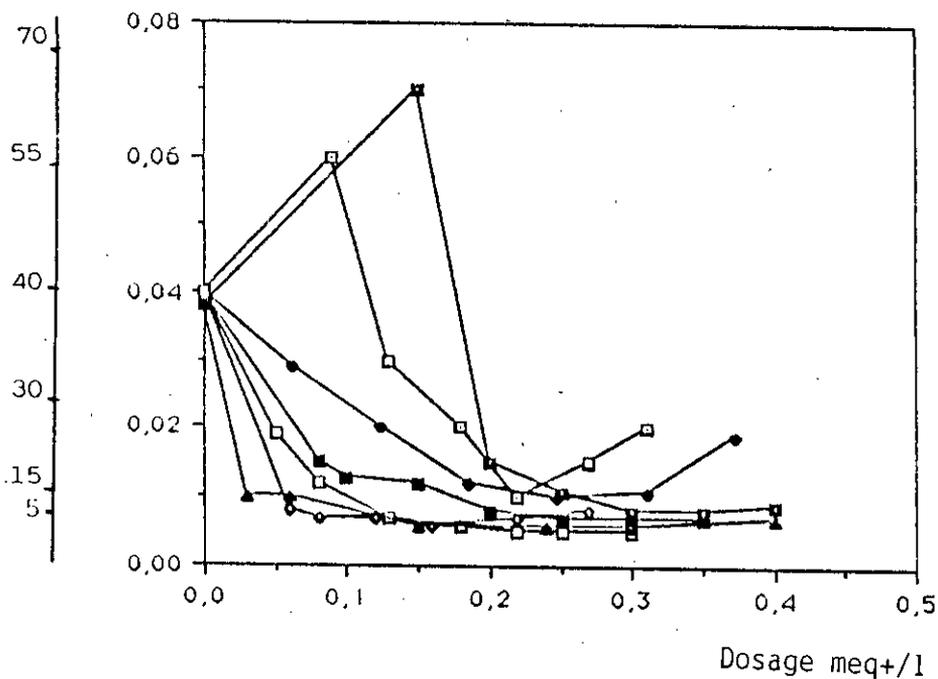
$$\begin{aligned} 0,22-0,18 &= 0,04 \text{ meq+/l..... avec l'Alun.} \\ 0,248-0,186 &= 0,062 \text{ meq+/l..... avec } AlCl_3. \\ 0,35-0,3 &= 0,05 \text{ meq+/l..... avec } FeCl_3. \end{aligned}$$

* Les éléments de couleur sont de petites molécules hydrophiles difficiles à déstabiliser, et exigent un peu plus de charges positives

que ne l'exigent les particules hydrophobes, faisant parallèlement diminuer un peu plus le PH, sachant que les éléments de couleur sont éliminés efficacement vers les valeurs de pH acide, soit 6 pour les sels de métaux.

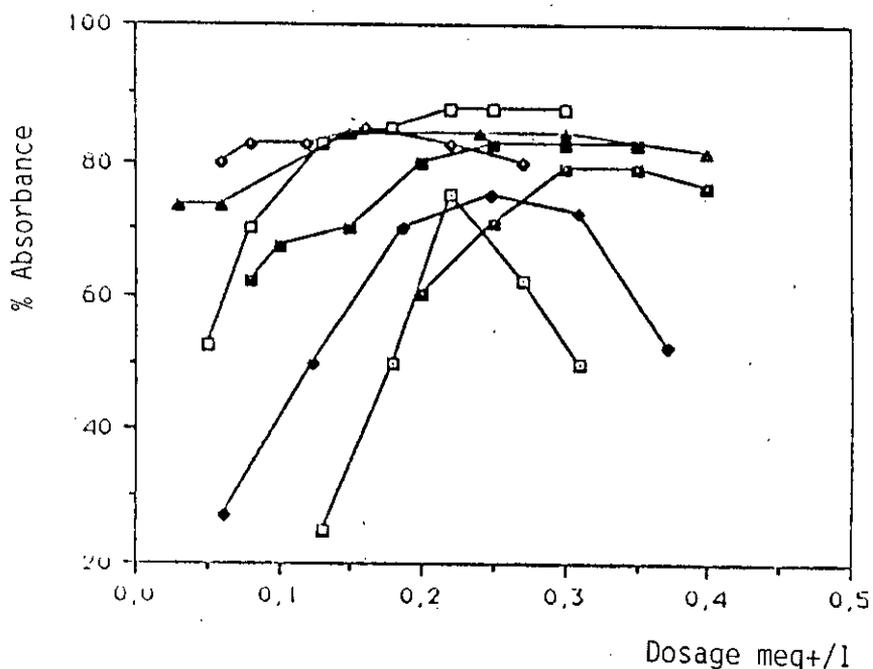
U. Hazen

Absorbance



Graphe N°9

Evolution de l'absorbance en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)



Graphe N°10

Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)

- Les polymères basiques éliminent la couleur d'une manière plus efficace et sur une large plage de dosage. Le décalage entre la dose optimale d'enlèvement de la turbidité et de la couleur n'est pas observée d'une façon nette, comme avec les sels de métaux.

* Les polymères basiques présentent une grande taille du principe actif; qui dès leur introduction dans l'eau, agissent par compression, adsorption, neutralisation, mécanisme préférentiel d'enlèvement des petites molécules solvatées;

- Les sels de métaux donnent une intensité de couleur supérieure à celle de l'eau brute dans la première partie du graphe 9, c'est à dire pour les faibles dosages, avant de décroître vers la valeur minimale.

* La faible dose de charge positive est insuffisante pour influencer la force ionique de l'eau, ni pour favoriser la formation de l'hydroxyde métallique insoluble. Le coagulant reste sous forme soluble et contribue à élever la couleur dans l'eau surtout dans le cas du FeCl₃ dont la couleur jaunâtre du fer est imposante.

-Il n'existe pas de norme internationale pour la mesure du degré de couleur par absorbance. Néanmoins, la norme OMS et Algérienne indique une valeur maximale acceptable de 15 unité Hazen. L'objectif est d'atteindre une couleur finale inférieure à 15 U.Hazen.

Des Graphes 9 et 10, nous déduisons le tableau 7:

Tableau 7: "Valeurs des pourcentages d'enlèvement optimes de la couleur."

COAGULANT.	Absorbance min résiduelle.	% d'absorbance éliminée	opt. Correspondance en U.Hazen
Alun	0,010	75,00	15
AlCl ₃	0,010	75,00	15
FeCl ₃	0,008	78,94	< 15
PSBA	0,007	82,50	5
PCBA	0,005	87,50	< 5
PCBF	0,006	84,20	< 5
PASS	0,006	85,00	< 5

(TABLEAU 7)

- Une efficacité supérieur du FeCl₃ par rapport aux sels d'aluminium.

- Une performance nette est observée avec les polymères basiques.

Performance qui classe ces derniers dans l'ordre décroissant d'efficacité

PCBA > PASS > PSBA.

* Le FeCl₃ est un bon coagulant de la couleur sur une eau à PH basique, ce qui est le cas avec pH=7,27, favorisant ainsi la formation de Fe(OH)₃, dont la grande surface spécifique adsorbe les petites molécules.

* La performance du PCBA par rapport aux autres polymères peut être expliquée par les ions sulfates qui freinent la déstabilisation des colloïdes organiques.

Utilisation de polyélectrolyte comme adjuvant.

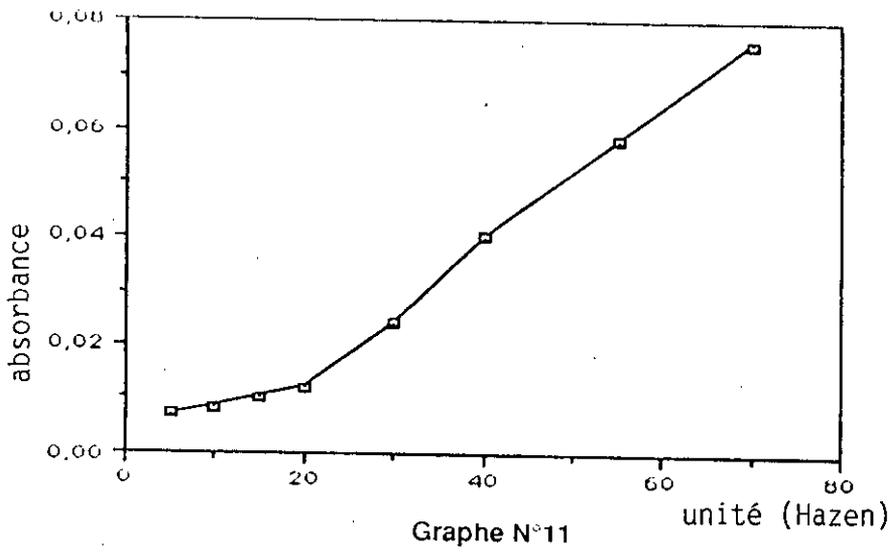
Les graphes 12 et 13 représentent l'évolution de l'absorbance et son pourcentage d'élimination en fonction du dosage en polyélectrolyte. introduit après la dose optimale de coagulant. Le tableau suivant en est déduit:

Tableau 8: "Pourcentages d'élimination optimaux de la couleur sans et avec ajout de polyélectrolyte."

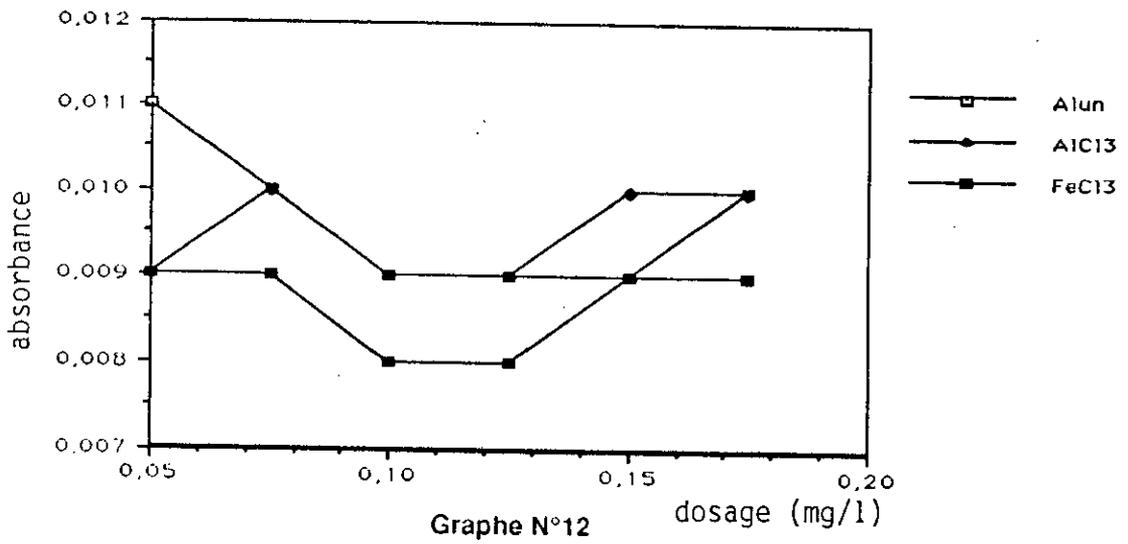
COAGULANT.	Couleur		% éliminée	Couleur après ajout de polyélectrolyte		% d'éliminat. finale.
	Abs	U.H		Abs	U.H.	
Alun	0,010	15	75,00	0,009	12	77,50
AlCl ₃	0,010	15	75,00	0,009	12	77,50
FeCl ₃	0,008	< 15	78,94	0,008	10	78,94
PSBA	0,007	5	82,50	-	-	-
PCBA	0,005	< 5	87,50			
PCBF	0,006	< 5	84,20			
PASS	0,006	< 5	85,00			

(TABLEAU 8)

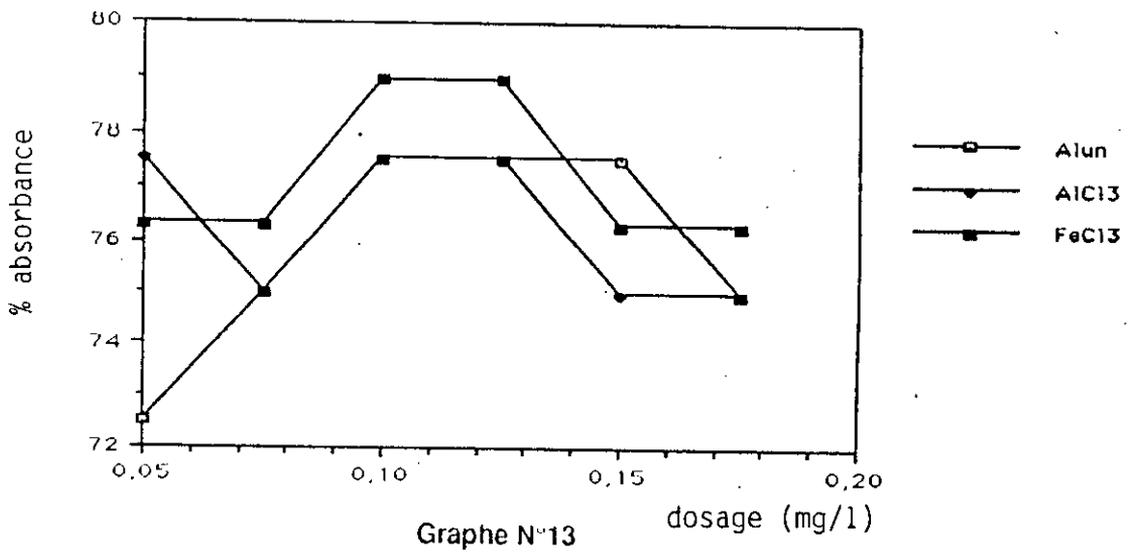
-L'ajout de polyélectrolyte améliore légèrement l'enlèvement de la couleur avec l'Alun, AlCl₃. LE FeCl₃ donne la même valeur finale d'absorbance. Les pourcentage d'élimination augmentent de 2,5 % pour les deux premiers sans toutefois atteindre l'efficacité des polymères basiques.



Graph N°11
 Etalonnage de l'absorbance à $\lambda = 373,4 \text{ nm}$ en fonction du degré HAZEN
 (Barrage de Keddara)



Graph N°12
 Evolution de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte
 (Barrage de Keddara)



Graph N°13
 Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte
 (Barrage de Keddara)

-Rivière Ste-Yacinthe.

La couleur est mesurée par l'absorbance à la longueur d'onde = 345 nm. Les graphes 14 et 15, représentent l'évolution et le % d'élimination de l'absorbance en fonction de la dose de coagulant.

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

Les courbes obtenus sur le graphe 14 diffèrent de celle obtenues concernant la turbidité:

- Le $AlCl_3$ donne une élimination de la couleur beaucoup plus appréciable que l'Alun.

- Le $FeCl_3$ donne le résultat le moins efficace

- Les polymères basiques sont de meilleure efficacité mais pour un dosage supérieur en Al et Fe

* Contrairement au résultat obtenu sur la turbidité, le $AlCl_3$ élimine la couleur plus efficacement que l'Alun. La cause serait due aux ions sulfates: Les coagulants sulfatés seraient particulièrement efficaces pour coaguler les colloïdes minéraux responsables de la turbidité, par contre gênés par la présence des ions sulfates pour éliminer les colloïdes organiques plus fortement chargés et pour lesquels les effets de charge sont plus importants (17).

*L'utilisation du $FeCl_3$, prévoit le mécanisme d'adsorption - destabilisation sur le diagramme. Les espèces solubles formées tendent à s'hydrolyser; L'élimination des éléments de couleur se fait encore plus difficilement que les éléments de turbidité. De plus, un ajout de couleur due à la complexation du fer avec les substances humiques de l'eau favorisé par le pH acide de 5,9 (27).

*L'utilisation des polymères basiques :

Le PASS est d'une efficacité incontestablement supérieure.

Le PCBF et le PCBA viennent en deuxième position.

Ici, parallèlement à la turbidité, la couleur minimale est conservée sur une large plage de dosage. La différence observée, est que la couleur résiduelle décroît proportionnellement au dosage croissant de coagulant, alors que la turbidité reste constante. Ceci est logique avec la taille et l'hydrophilie des matières organiques.

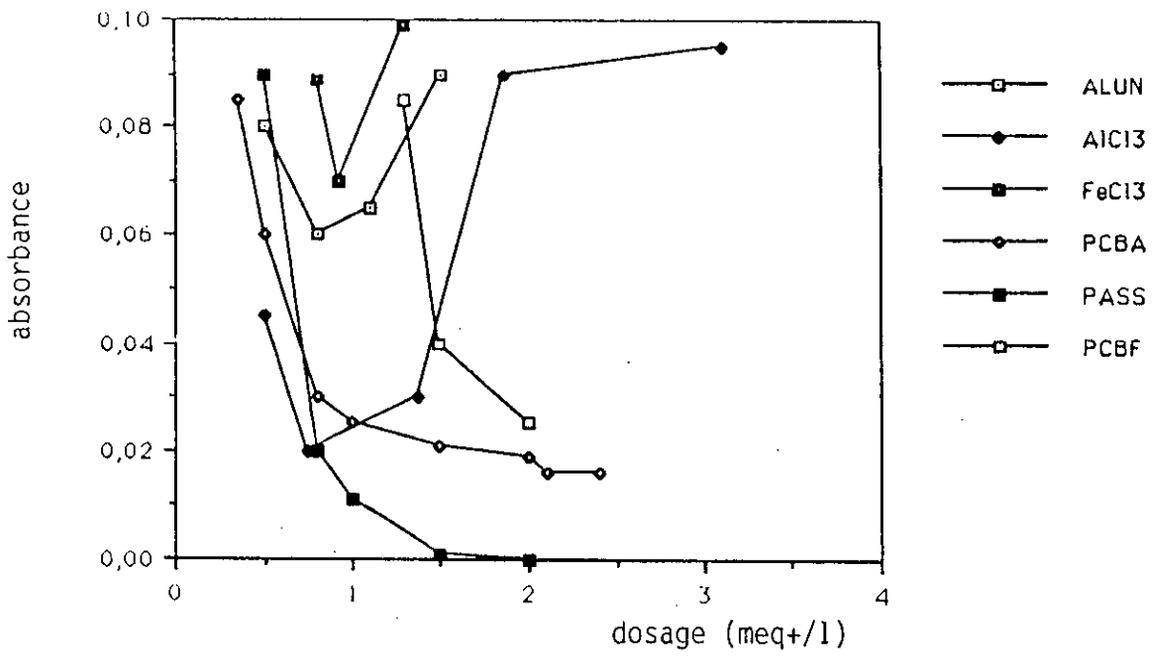
Le mécanisme d'action du PCBF est insensible au pH, l'élimination de la couleur est meilleure qu'avec l'emploi de $FeCl_3$. Cependant, le dosage est plus élevé, ce qui est dû à:

- . L'effet d'encombrement stérique .
- . Une partie du Fe qui se complexe avec la matière organique.
- . La petitesse des polymères.

Ajout de polyélectrolyte comme adjuvant

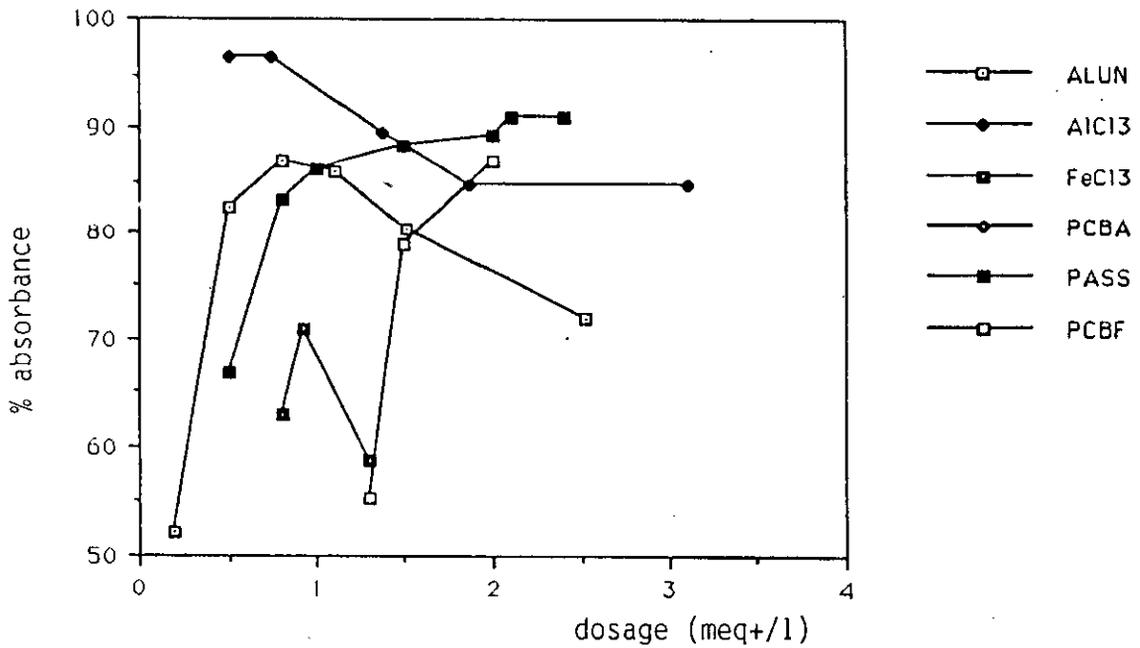
Les résultats sont représentés sur les graphes 16 et 17.

Le tableau 9 en est déduit



Graphe N°14

Evolution de l'absorbance en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)



Graphe N°15

Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)

Tableau 9: "Pourcentages d'élimination optimaux de la couleur avec et sans ajout de polyélectrolyte."

COAGULANT.	% max d'élimination sans ajout de polyélectrolyte	% max d'élimination avec ajout de polyélectrolyte
Alun	86,95	85,38
AlCl ₃	92,30	92,30
FeCl ₃	70,80	81,25
PASS	91,66	91,66
PCBA	91,11	-
PCBF	86,84	-

(TABLEAU 9)

- Les résultats sont inchangés aussi bien avec les sels d'Al qu'avec le PASS.
- Seul le traitement avec le FeCl₃ est amélioré par l'ajout de polyélectrolyte.

* Le rôle joué par le polyélectrolyte associé aux sels d'Al est celui de floculant alourdisant les floes et non celui de coagulant.

* Sachant que le polyélectrolyte cationique agit par adsorption et pontage (19), la quantité ajoutée vient compléter le travail de coagulation - floculation du FeCl₃ déperdit par faute de mécanisme non optimisé.

* Pour les polymères basiques l'ajout de polyélectrolyte est inutile.

CONCLUSION :

1 - Une élimination optimale de turbidité n'implique pas un enlèvement optimal de couleur. Mais un bon enlèvement de couleur implique toujours un bon enlèvement de turbidité.

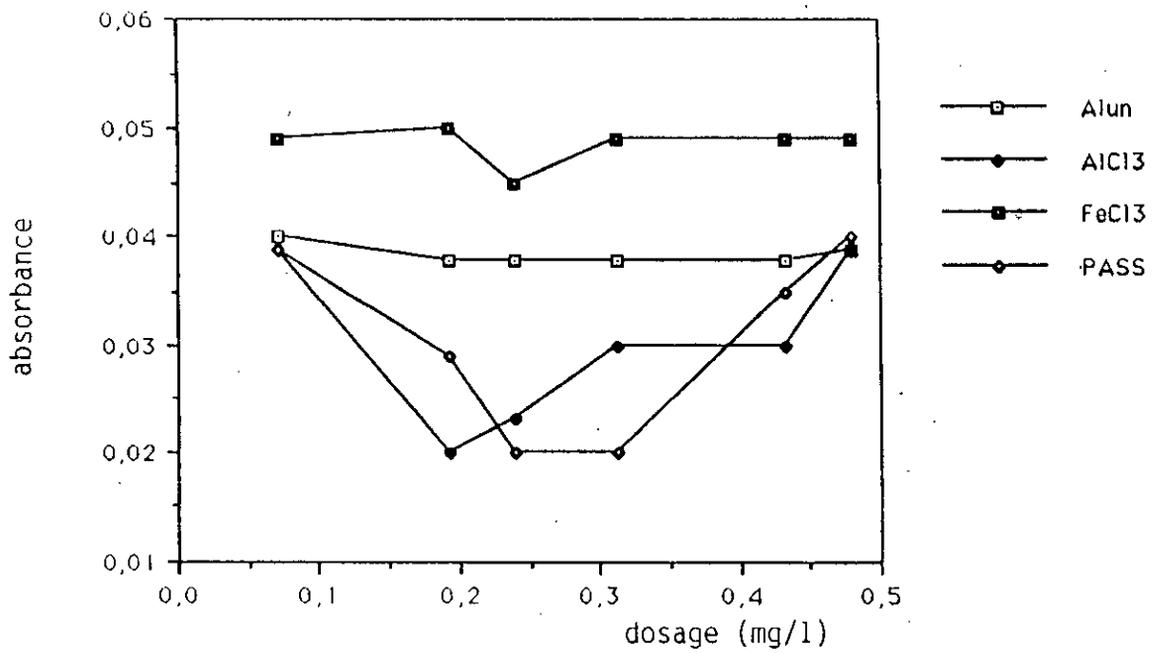
2 - Les sels de métaux réagissent de façon optimale à l'intérieur de la zone du mécanisme "sweep coagulation". Leur efficacité est sensible au pH de l'eau.

3 - Le chlorure de Fe donne des résultats médiocres quant à l'enlèvement de la couleur sur une eau fortement colorée (chargée de matières organiques).

4 - Le traitement des polymères basiques n'est pas influençable par le pH de l'eau. Ils agissent par compression, adsorption et neutralisation. Mécanisme efficace pour l'enlèvement de la couleur.

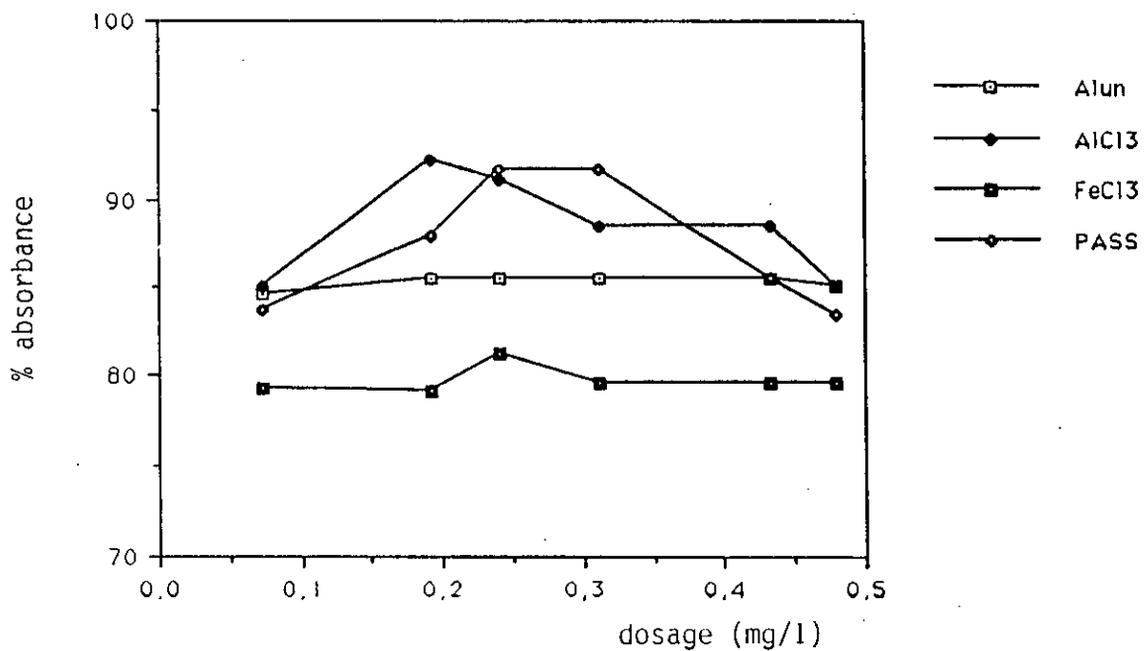
5 - En général l'ajout de polyélectrolyte n'améliore que faiblement l'enlèvement de la couleur.

6 - L'ajout de polyélectrolyte aux polymères basiques est inutile aussi bien à l'enlèvement de la turbidité qu'à celui de la couleur.



Graphe N°16

Evolution de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte (Rivière Sainte Yacinthe)



Graphe N°17

Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte (Rivière Sainte Yacinthe)

C - MATIERES ORGANIQUES .

- BARRAGE KEDDARA :

Les matières organiques sont évaluées en mesurant les matières oxydables par $KMnO_4$. (mo).

Les m.o sont constituées en grande partie de particules organiques oxydables mais renferment aussi des éléments minéraux.

Le graphe 18 représente le pourcentage d'élimination des m.o en fonction de la dose de coagulant. On en déduit le tableau suivant:

Le tableau 10: " Pourcentages d'élimination optimaux de mo avec etsans ajout de polyélectrolyte."

COAGULANT.	Dose Opt. meq+/l.	% d'éliminat. de m.o ,(sans polyélectrolyte)	% d'éliminat. de m.o,(avec polyélectrolyte)
Alun	0,180	34,60	38,00
AlCl ₃	0,186	33,40	42,50
FeCl ₃	0,300	36,53	39,13
PSBA	0,250	45,00	-
PCBA	0,220	50,00	-
PCBF	0,240	50,00	-
PASS	0,160	42,30	-

(TABLEAU 10).

- D'une façon générale les polymères basiques sont nettement plus performants que les sels de métaux.

- L'ajout de polyélectrolyte comme adjuvant (graphe 19), sur les sels de métaux améliore l'enlèvement sans toutefois atteindre l'efficacité des polymères seuls.

RIVIERE STE YACINTHE

Afin de préciser les résultats obtenus de la coagulation des m.o sur une eau chargée, nous avons adopté la démarche suivante :

Maintien d'une turbidité finale proche de 0,4 NTU après traitement aux différents coagulants.

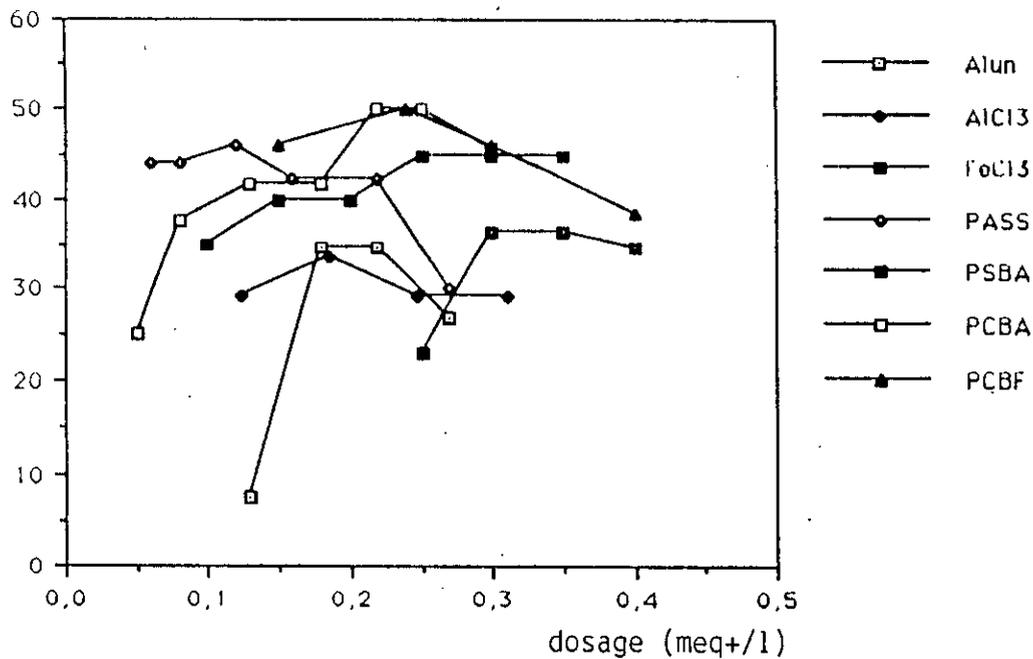
Les doses requises sont alors tirées du graphe 5.

L'eau décantée subit les analyses de turbidité, pH, absorbance, m.o, COT et COD.

Les conditions de traitement n'ont pas facilité le maintien dans les 6 bechers la turbidité finale à 0,4 NTU. Nous avons du procéder à plusieurs essais en faisant varier les dosages.

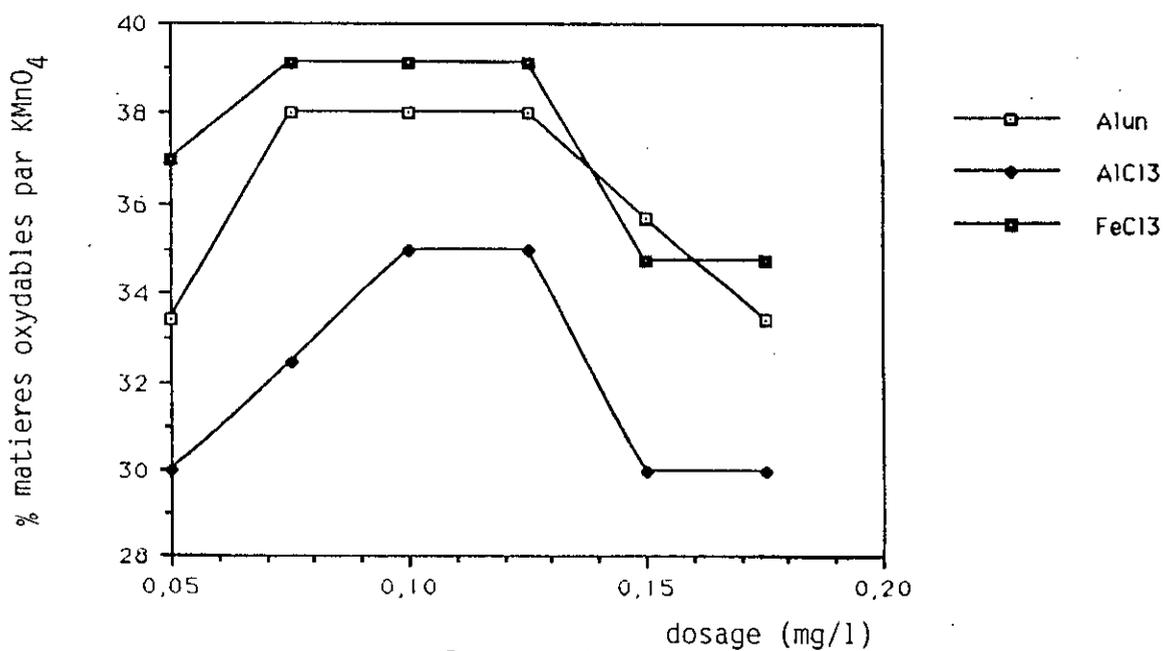
L'ajout de polyélectrolyte sur les sels métalliques est maintenu à 0,312 mg/l. Le tableau 11 reprend les résultats obtenus.

matières oxydables par KMnO_4 (mg O_2/l)



Graphe N°18

Pourcentage d'élimination des matières oxydables par KMnO_4
en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)



Graphe N°19

Pourcentage d'élimination des matières oxydables par KMnO_4
en fonction du dosage en polyélectrolyte
(Barrage de Keddara)

Tableau 11: "Elimination des matières organiques par les différents coagulants pour une même turbidité résiduelle sur l'eau brute de la rivière Sainte-Yacinthe."

	Alun	AlCl ₃	FeCl ₃	PASS	PCBA	PCBF	Eau brute.
Coagulant meq+/l	0,8	0,8	1,0	0,8	0,5	1,5	-
Polyéléctrol. mg/l.	0,312	0,312	0,312	-	-	-	-
pH	6,1	5,8	6,0	6,6	6,9	6,4	7,1
Turbid. NTU.	0,40	0,40	0,45	0,40	0,35	0,50	21,0
m.o. mgO ₂ /l	3,7 (62,24%)	3,7 (62,24%)	3,9 (60,20%)	3,5 (64,28%)	3,7 (62,24%)	3,7 (62,24%)	9,8 -
Absorb.	0,030 (87,50%)	0,025 (89,59%)	0,070 (70,83%)	0,015 (93,75%)	0,025 (89,59%)	0,050 (79,16%)	0,240 -
COT ppm.c	3,24472 (61,27%)	3,32100 (60,35%)	3,93400 (52,37%)	3,09460 (63,09%)	3,26260 (61,05%)	3,2329 (61,41%)	8,37780 -
I C. ppm.c	7,5800	13,2390	10,7700	7,7979	9,2494	9,0821	15,2380
T C. ppm.c	10,825	16,560	14,710	10,893	12,512	12,315	23,216
COD. ppm.c	3,2201 (58,87%)	3,1661 (59,56%)	3,7290 (52,37%)	2,9993 (61,69%)	5,2417 (58,59%)	3,2305 (58,74%)	7,8292 -
IC. ppm.c	10,8319	12,4639	12,9900	10,8150	11,1793	11,0815	14,0860
TC.	14,052	14,632	16,710	13,815	14,421	14,312	21,915

(TABLEAU 11)

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

- Dosage requis de coagulant :

. Avec les sels d'Al et le PASS, même dosage requis.

. Avec le PCBA, le dosage requis est diminué de 0,3 meq+/l ce qui équivaut à 23 mg AlCl₃.

. Avec le PCBF et FeCl₃, les dosages requis sont, comme prévu, supérieurs à ceux des dérivés d'Al.

- Matières organiques :

L'eau brute exige 9,8ml O₂/l pour oxyder les matières organiques.

L'évaluation de l'efficacité des différents coagulants est représentée dans l'ordre décroissant suivant :

1- PASS : Elimine..... 64,28 % de m.o.

2- Alun , AlCl₃, PCBA, PCBF : Eliminent 62,24 % de m.o.

3- FeCl₃ : Elimine60,20 % de m.o.

PASS : meilleure efficacité.

FeCl₃ : plus faible efficacité.

La différenciation d'efficacité entre PCBA, PCBF et les sels d'AL sera précisée plus loin.

- Absorbance à λ max = 345 nm :

L'absorbance en UV a montré une différence d'enlèvement de matières organiques entre les dérivés d'Al :

1- PASSélimine 93,75 % d'absorbance.

2- PCBA et AlCl₃..... " 89,59 % "

3- Alun " 87,50% "

4- PCBF " 79,16 % "

5- FeCl₃..... " 70,83 % "

- Mesure du COT (carbone organique total) et COD (carbone organique dissout)

Une meilleure précision est obtenue quant à la différenciation de l'efficacité des coagulants :

Tableau 12: "Valeurs des pourcentages d'élimination optimaux du COD et du COT."

COAGULANT.	% COT ELIMINE.	% COD ELIMINE.
PASS	63,09	61,69
PCBF	61,41	58,73
PCBA	61,05	58,59
AlCl ₃	60,35	59,56
Alun	61,27	58,87
FeCl ₃	52,37	53,04

(TABLEAU 12)

- Le PASS garde toujours son premier rang. Vient ensuite le PCBF malgré une mauvaise élimination de l'absorbance, puis le PCBA.
- Les sels d'Al se révèlent d'une efficacité semblable à celle du PCBA et PCBF.
- L'Alun fait diminuer le COT plus efficacement que le AlCl₃. Le contraire est observé avec le COD.
- Le FeCl₃ donne l'élimination la moins élevée.

* L'efficacité des sels d'Al est liée aux conditions de déroulement du mécanisme "sweep coagulation" :
 . Une turbidité appréciable servant de noyaux dans la formation de l'hydroxyde final et donc du floc.
 . pH acide de 6,1 à 5,8, valeurs favorables à l'élimination de la couleur.

* Le sulfate d'Al et l' AlCl₃ diffèrent par leurs anions correspondants :
 (SO₄)²⁻ et Cl⁻.
 La différence de propriété a fait la différence de comportement à l'égard de l'élimination des matières organiques.

* Les polymères basiques agissent à des doses relativement élevées dans une eau chargée (eau de Ste-Yacinthe).
 Ceci est dû au blocage des centres actifs par effet d'encombrement stérique.

* FeCl₃ à pH acide (= 6) se trouve hors de la zone du mécanisme "sweep coagulation". La formation de Fe(OH)₃ est alors minime et les espèces solubles présentes se complexent avec la charge organique augmentant la couleur de l'eau finale.

* PASS est un produit industriel. Les polymères ont une structure stable .Les résultats en confirment l'efficacité.

* PCBF est un bon coagulant des matières organiques malgré le taux d'absorbance élevé enregistré. Cela s'explique par la dose requise élevée du coagulant et par sa couleur dominante en solution (même à faible dose).

- Carbone organique dissout et carbone organique colloïdal.

Le COD contenu dans l'eau brute est de 7,8392 ppm.

Le COT " " " " " " 8,3778 ppm.

Carbone organique colloïdal = COT - COD.

= 8,3778 - 7,8292 .

= 0,5486 ppm.

Tableau 13: " Elimination du COD et du carbone organique colloïdal."

COAGULANT.	C.O. colloïdal. COT-COD.	C.O. colloïdal. % d'élimination.	COD. % d'élimination.
Alun	0,02462	95,51	58,87
AlCl ₃	0,15490	71,76	59,56
FeCl ₃	0,20500	62,63	52,37
PASS	0,09530	82,62	61,69
PCBA	0,02090	96,19	58,59
PCBF	0,00240	99,56	58,74

(TABLEAU 13).

- De manière générale, le carbone organique colloïdal s'élimine plus efficacement que celui dissout.

- Le taux de carbone organique colloïdal éliminé est sensiblement plus élevé par l'utilisation de l'Alun qu'avec l'AlCl₃. Ce dernier est par contre plus efficace dans l'élimination du carbone dissout.

- Le PASS montre une performance élevée dans l'élimination des molécules organiques dissoutes et légèrement moins efficace dans celle du carbone colloïdal. Inversement avec le PCBA et le PCBF.

* Les ions sulfate (sulfate d'Al) favorisent les éléments colloïdaux de turbidité en accélérant la formation de l'hydroxyde insoluble et freinent la coagulation des petites molécules organiques fortement chargées.

* La différence des résultats entre PASS, PCBA et PCBF, est due à la différence de structure et de propriétés des polymères ainsi qu' à leurs anions correspondants.

- Carbone inorganique :

La teneur en carbone inorganique (CI) de l'eau brute de Ste Yacinthe est supérieure à celle du carbone organique (CO) :

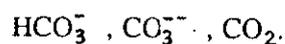
Teneur en CI = 15,238 ppm.

Teneur en COT = 8,3778 ppm.

Teneur en CI dissout = 14,312 ppm.

" " COD = 7,8292 ppm.

Cette partie du carbone inorganique est constituée essentiellement de :



CONCLUSION :

- L'élimination des matières colloïdales organiques est généralement plus difficile à réaliser que celle des matières colloïdales inorganiques.
- Pour une eau peu chargée, les polymères basiques éliminent les matières organiques de couleur de manière nettement plus efficace que les sels de métaux associés aux polyélectrolytes même à des doses inférieures.
- Pour une eau chargée l'enlèvement des matières organiques s'avère d'une efficacité sensiblement égale entre les sels d'Al et leurs polymères pour un même dosage. Pour des dosages supérieurs l'efficacité des polymères est supérieure.
- Il importe de minimiser la présence de THM dans l'eau finale en optimisant l'élimination des matières organiques car la préchloration est applicable à la station de Boudouaou :
Dans le cas d'utilisation de sels métalliques, le dosage et le pH doivent être minutieusement contrôlés.
Avec les sels d'Al, un pH acide(=6) favorise l'élimination des matières organiques.
Avec $FeCl_3$, un pH basique ou neutre optimise l'élimination des matières organiques. Son utilisation dans une eau riche en matières organiques est déconseillée en raison de sa prédisposition à la complexation.
- Dans le cas d'utilisation de polymères basiques, le traitement est beaucoup moins sensible au pH et une meilleure élimination de matières organiques, (et donc de précurseurs de THM), est assurée.

D- pH ET ALCALINITE .

Rappel théorique:

Pour les eaux naturelles, si le pH de l'eau est compris entre 4,5 et 8,3, les seules espèces alcalines présentes en quantité mesurable par titrage sont les bicarbonates HCO_3^-

La détermination de l'alcalinité totale équivaut donc à la mesure des bicarbonates.

Le pH optimal de coagulation dépend de l'eau à traiter. Il est compris dans l'intervalle (6 - 7,4) pour les sels d'Al et dans l'intervalle (5,5- 8,5) pour les sels de Fe.

Ces valeurs ne doivent pas être confondues avec celles du minimum de solubilité des précipités d'hydroxyde de Fe ou d'Al, car le coagulant est actif sous forme dissoute (2).

Le pH optimal de coagulation et la solubilité minimale de l'hydroxyde métallique sont fortement influencés par la force ionique et la présence de composés organiques (36).

BARRAGE KEDDARA :

1- pH :

Les graphes 20 et 21 montrent respectivement l'évolution du pH en fonction du dosage de coagulant sur l'eau de Keddara et celle de Ste Yacinthe.

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

- Avec les sels métalliques :

Aux dosages optimaux, les valeurs du pH final de l'eau sont :

AlunpH = 7,37.
AlCl₃ pH = 7,57.
FeCl₃pH = 7,37.

La mesure du pH équilibre par la méthode de l'essai au marbre a donné une moyenne de 7,55.

Ces valeurs se rapprochent de celles du pH optimal de coagulation (pH = 7,4), de celle du pH de saturation et sont comprises dans l'intervalle (6,5 - 8,5) de potabilité.

A l'usine de traitement de Boudouaou, le pH de coagulation est maintenu dans l'intervalle (7,3 - 7,5).

Si le pH n'est pas compris dans cet intervalle après chloration et addition de coagulant, de l'acide sulfurique est ajouté. Le pH prend alors la valeur de 7,4 et nous tenterons de la maintenir jusqu'à la fin du traitement afin d'éviter l'ajout de correctif.

- Avec les polymères basiques :

Aux dosages optimaux la valeur du pH décroît de 8 à :

pH = 7,89 à 7,85.....avec PCBA.
pH = 7,85 à 7,7 " PCBF.
pH = 7,78 à 7,64..... " PASS
pH = 7,7 à 7,6 " PSBA.

Cette diminution de la valeur du pH respecte logiquement l'ordre croissant des rapports de neutralisation : $r = \text{OH} / \text{Me}^{3+}$.

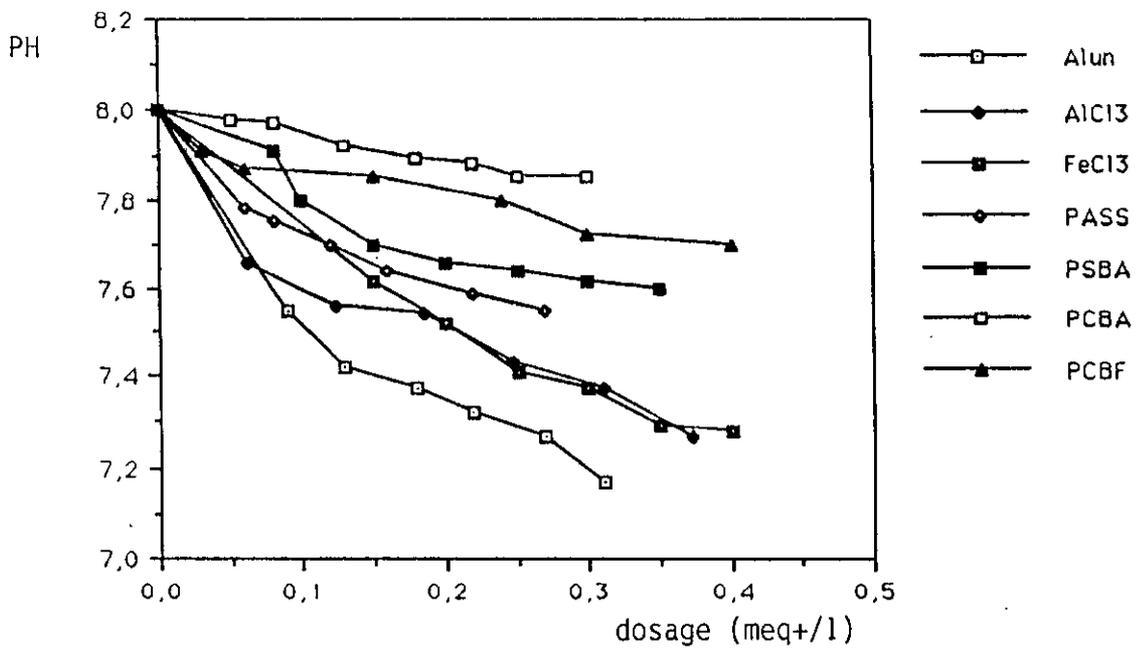
$r = \text{OH} / \text{Al} = 2,5$ _____ PCBA.
 $r = \text{OH} / \text{Fe} = 2,0$ _____ PCBF.
 $r = \text{OH} / \text{Al} = 1,5$ _____ PSBA.
 $r = \text{OH} / \text{Al} = 1,5$ _____ PASS.

- Avec les polymères basiques, le domaine du pH optimal est très large, de 4 à 9. (2). Ceci explique l'insensibilité du traitement au pH.

Ici la correction du pH se fait pour les raisons suivantes :

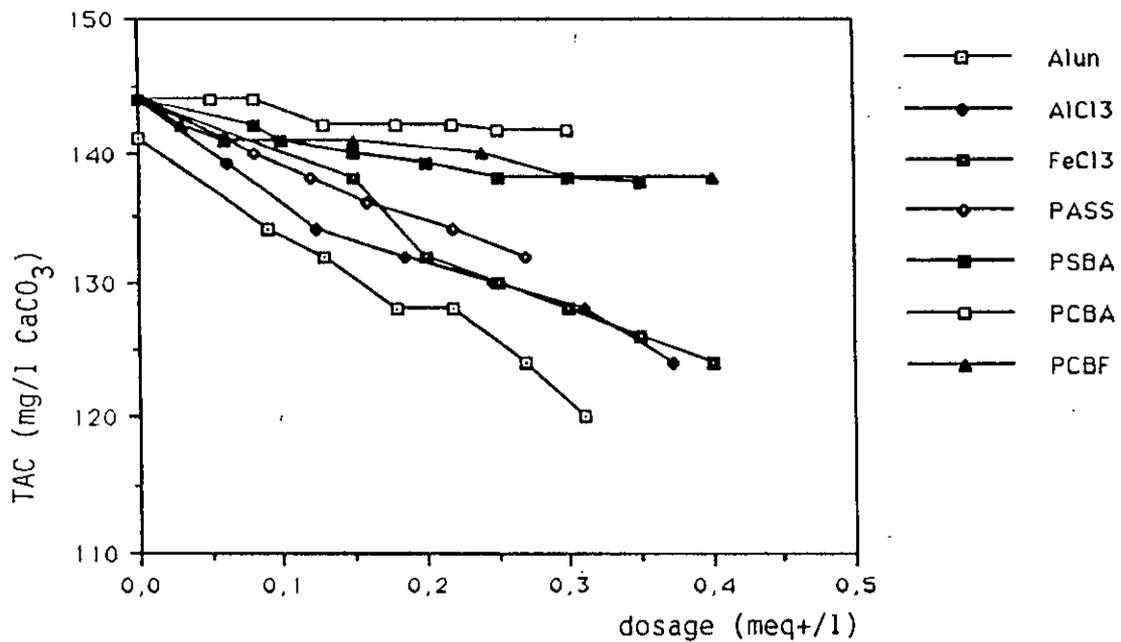
- Minimiser la solubilité de l'Al ou du Fe dans l'eau.
- Rapprocher la valeur du pH de celle de saturation.

Le premier point est très important. Son étude est rapportée plus loin.



Graphe N°20

Evolution du PH en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)



Graphe N°22

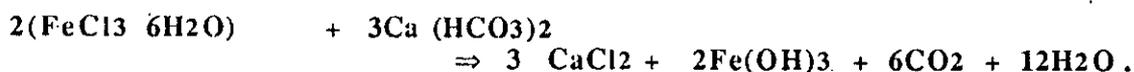
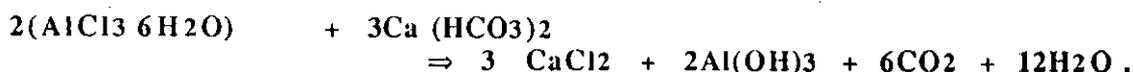
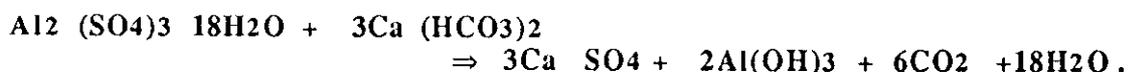
Evolution du TAC en fonction des taux de coagulants
(Barrage de Keddara)

2- TAC (titre alcalimétrique complet) :

Le graphe 22 représente l'évolution du TAC en fonction du dosage.

OSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

-Les réactions de neutralisation du coagulant par l'alcalinité :



De ces 3 équations on déduit :

- Une masse x d'Alun neutralise une masse de 0,45 x d'alcalinité exprimée en CaCO₃.
- Une masse x d'AlCl₃ neutralise une masse de 0,62 x de CaCO₃.
- Une masse x de FeCl₃ neutralise une masse de 0,55 x de CaCO₃.

Le tableau suivant est déduit du graphe 22:

Tableau 14: "Evaluation de la consommation d'alcalinité par les sels de métaux pour les doses optimales."

COAGULANT	DOSE /l.		TAC (EB)	TAC (ED)	TAC ayant	TAC théori-
	meq+	mg	mg/l de CaCO ₃ .	mg/l de CaCO ₃ .	réagi.	-que.
Alun	0,180	20	141	128	13	9,00
AlCl ₃	0,186	14,96	144	132	12	9,27
FeCl ₃	0,300	27,03	144	128	16	14,86

(TABLEAU 14).

- La quantité d'alcalinité qui a réagi expérimentalement est supérieure à celle calculée théoriquement.

* La traitement par coagulation consomme de l'alcalinité pour la réaction d'hydrolyse, puis élimine une partie de l'alcalinité par coagulation.

- Avec les polymères basiques, l'alcalinité consommée en introduisant une même dose que celle des sels d'origine est représentée dans le tableau 15:

Tableau 15: "Evaluation de la consommation d'alcalinité par les polymères basiques pour un même dosage que celui des sels de métaux."

COAGULANT.	DOSE REQUISE meq+/l.	TAC (EB)	TAC (ED)	TAC ayant réagit
PCBA	0,186	144	142,0	2,0
PSBA	0,180	144	139,5	4,5
PCBF	0,300	144	138,0	6,0

(TABLEAU 15)

- La quantité d'alcalinité consommé par les aluns basiques diminue logiquement avec l'augmentation du rapport de neutralisation.
- L'alcalinité consommée est beaucoup moins importante : Soit les rapports d'alcalinité consommée entre les deux types de coagulant:

$$\begin{aligned} \text{Alun / PSBA} &= 13 / 4,5 = 2,88. \\ \text{AlCl}_3 / \text{PCBA} &= 12 / 2 = 6,00; \\ \text{FeCl}_3 / \text{PCBF} &= 16 / 6 = 2,66 \end{aligned}$$

RIVIERE STE_YACINTHE

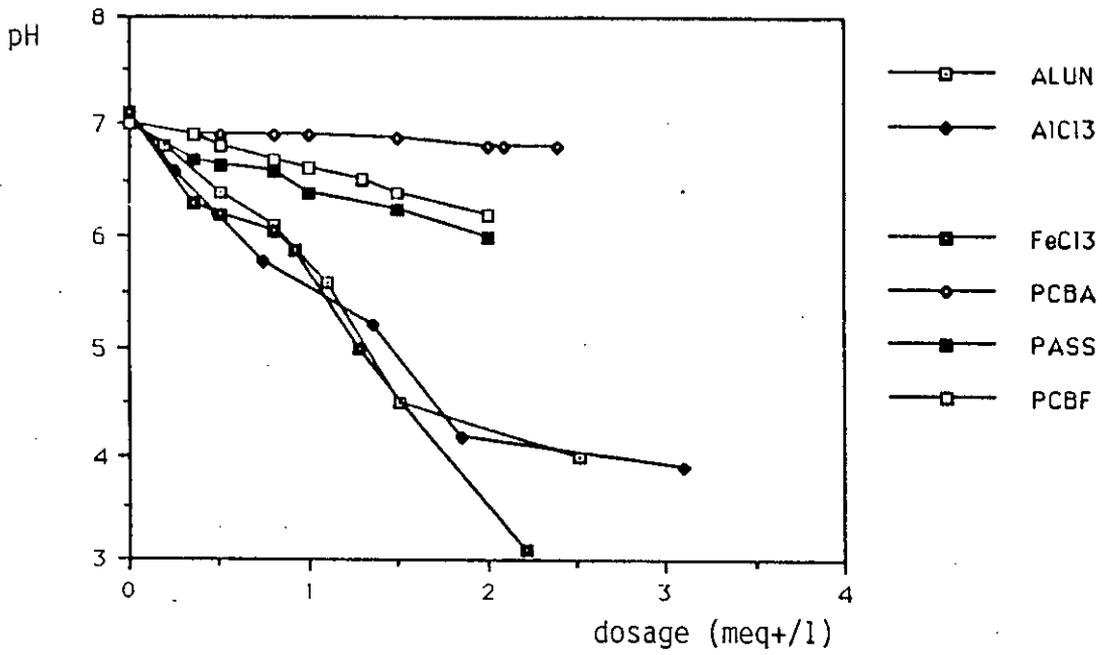
1 - pH

Le graphe 21, représente l'évolution du pH en fonction du dosage. -La gamme de coagulant introduite dans les 6 bechers est de (0,2 à 2,4 meq+/l) . Elle est de 8 à 10 fois plus grande que celle introduite pour le traitement de l'eau de Keddara . La baisse du pH après traitement est logiquement plus importante.

Tableau 16: "Valeur du pH pour les doses optimales de coagulants."

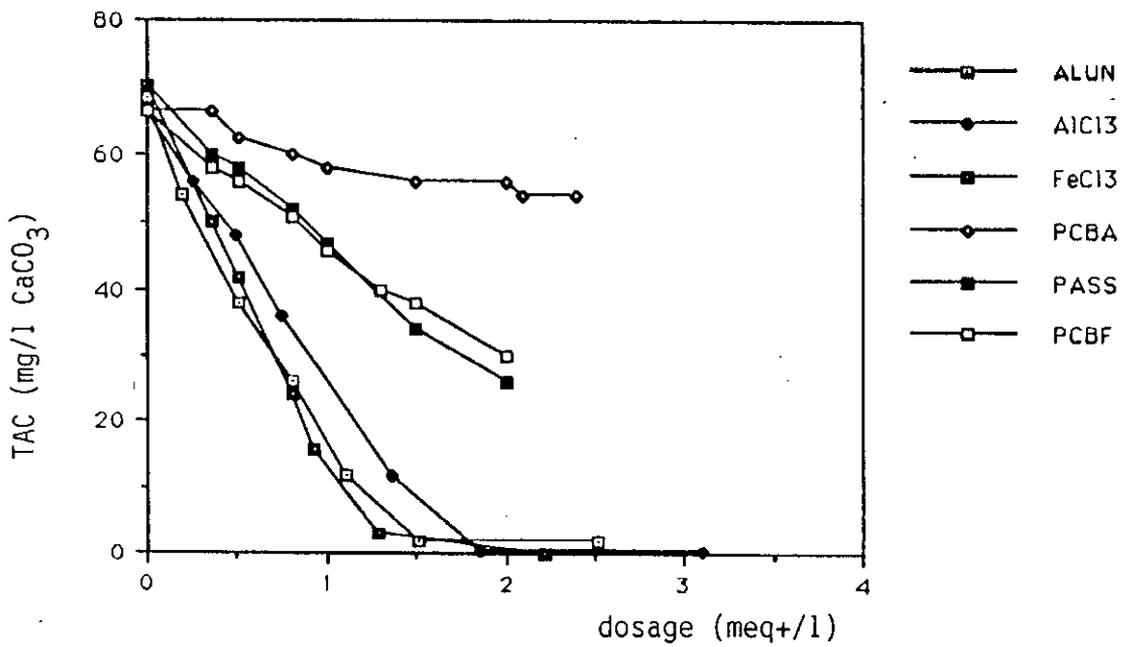
COAGULANT	pH de l'eau brute.	pH de l'eau décantée.
Alun	7	6,00
AlCl ₃	7	5,80
FeCl ₃	7	5,90
PCBA	7	6,80 - 6,90
PCBF	7	6,41 - 6,51
PASS	7	6,60 - 6,40

(TABLEAU 16)



Graphe N°21

Evolution du PH en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)



Graphe N°23

Evolution du TAC en fonction des taux de coagulants
(Rivière Sainte Yacinthe)

-La coagulation de l'eau de Ste-Yacinthe, se fait à un pH acide. Un ajout d'alcalinité est nécessaire pour optimiser le pH du traitement , surtout dans le cas d'emploi de FeCl₃ dont le pH optimal est basique.

- Le PCBA indique une baisse insignifiante du PH dû à son r élevé.

- Avec les polymères basiques, le traitement est optimal sur une large plage de PH; ce qui évite l'ajout de correctifs .

2-TAC

Les directives de CEE donnent une concentration minimale requise pour les eaux ayant subi un traitement d'adoucissement, de 2,5 °F et l'eau ne doit pas être agressive.

Le traitement de l'eau de Ste-Yacinthe avec les différents coagulants fait diminuer l'alcalinité aux valeurs indiquées dans le tableau 17:

Tableau 17: "Evaluation de la consommation d'alcalinité pour la dose optimale des différents coagulants."

COAGULANT	DOSE / l		TAC (EB) mg/l CaCO ₃	TAC (ED) mg/l CaCO ₃	TAC ayant réagit	TAC théorique
	meq+	mg				
Alun	0,80	80	70	26	44	40
AlCl ₃	0,75	60,35	70	36	34	37
FeCl ₃	0,923	83,16	70	16	54	45
PCBA	0,505		70	62	8	
PCBF	1,300		70	40	3	
PASS	0,808		70	52	18	

(TABLEAU 17)

-On remarque que les polymères basiques consomment beaucoup moins d'alcalinité. Ils sont donc plus avantageux pour les eaux dont l'alcalinité de départ est faible.

2-Résultats des tests effectués exclusivement sur l'eau de Keddara.

E- Al ET Fe RESIDUELS :

OBSERAVATIONS ET INTERPRETATIONS :

-L'eau brute du barrage Keddara est exempte d'Al,mais renferme cependant une petite quantité de Fe de l'ordre de 0,02 ppm. Cette dernière valeur est soustraite de celle du Fe résiduel.

Le graphe 24, représente l'évolution de l'Al et du Fe résiduel par l'emploi de tous les coagulants.

Le tableau suivant en est déduit:

Tableau 18: "Al et Fe résiduels et pH correspondant aux dosages optimaux."

COAGULANT.	Al ou Fe résiduel. mg/l	pH.
Alun	0,051	7,37
AlCl ₃	0,065	7,54
FeCl ₃	0,054	7,37
PCBA	0,240	7,88
PSBA	0,210	7,64
PCBF	0,067	7,80
PASS	0,175	7,70

(TABLEAU 18)

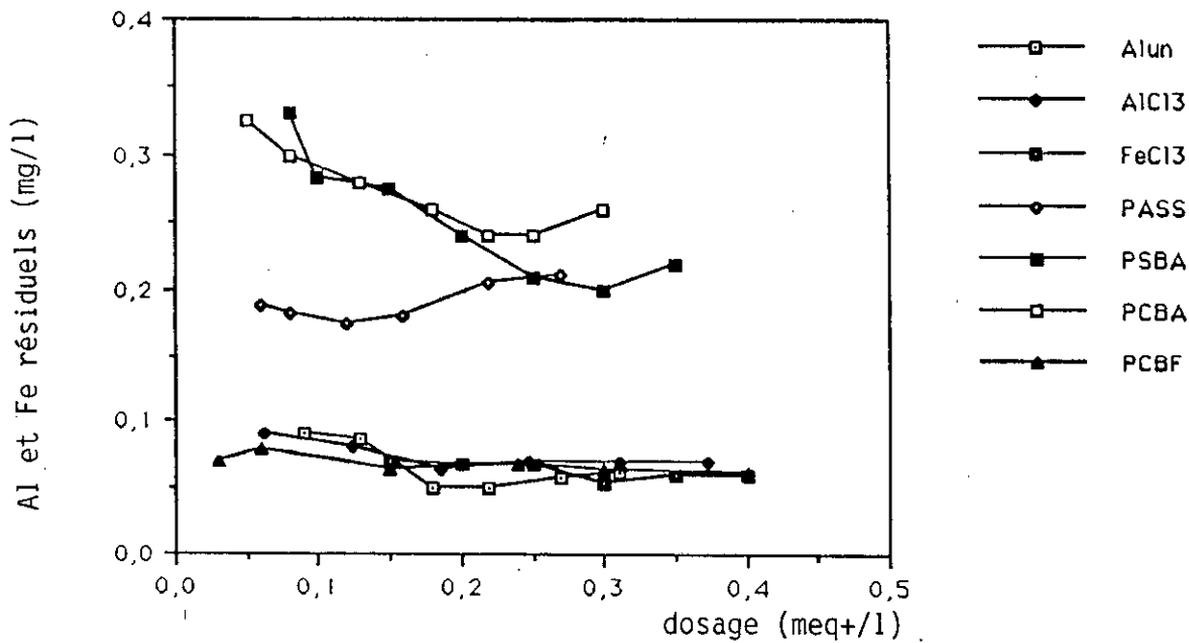
- Sur le graphe 24, la différence de la quantité d'Al résiduelle soluble issue du traitement par l'ensemble des coagulants apparait sous forme de courbes décalées.

* Sachant que :

.A partir de pH= 7,5, Al(OH)₃ commence à se transformer en aluminat soluble Al(OH)₄⁻ (74)

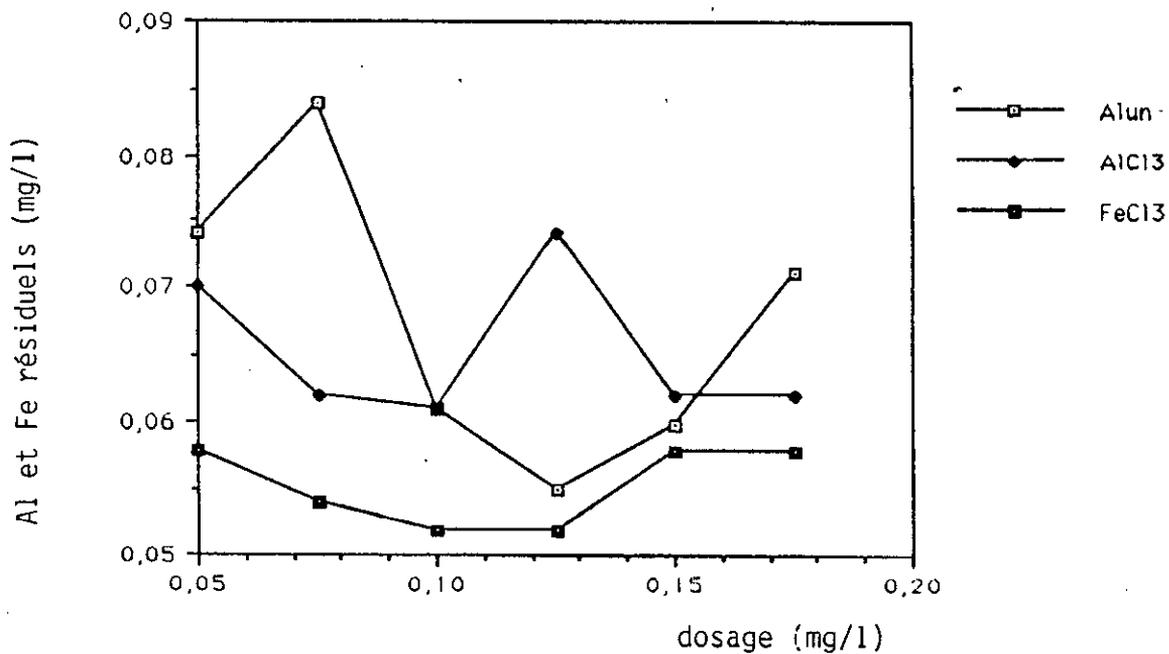
.le pH de l'eau brute de Keddara étant basique ,
Le traitement utilisant les polymères basiques diminue le pH de l'eau vers les valeurs comprises entre 7,64 et 7,88. Valeurs qui contribuent à solubiliser l'Al dans l'eau décantée.

* L'utilisation des sels d'Al fait tendre la valeur du pH vers 7,4 . L'Al soluble résiduel est alors logiquement moins élevé.



Graphe N°24

Evolution de l'aluminium et du fer résiduels en fonction des taux de coagulants (Barrage de Keddara)



Graphe N°25

Evolution de l'aluminium et du fer résiduels en fonction du dosage en polyélectrolyte (Barrage de Keddara)

* La quantité de Fe résiduel issue du traitement avec le $FeCl_3$ est semblable à celle issue du traitement par PCBF. Les PH finaux respectifs seront de 7,37 et 7,8.

Ceci est dû à la solubilité du Fe qui est minime sur une large plage de pH basique. Le pH de solubilité minimal de $Fe(OH)_3=8$ (voir les diagrammes d'AMIRTHARAJAH).

* La dose de coagulant introduite dans l'eau ne semble pas avoir une influence sur les valeurs de Fe et d'Al résiduels; Ces dernières sont plus ou moins constantes en fonction du dosage croissant.

Influence du polyélectrolyte introduit comme adjuvant.

Le graphe 25 donne l'Al et le Fe résiduels en fonction de la dose de polyélectrolyte.

Le tableau 19 est déduit de ce graphe:

Tableau 19: "Influence du polyélectrolyte sur le résiduel en Al et Fe."

COAGULANT.	Al ou Fe résiduels; Sans ajout de polyélectrolyte.	Al ou Fe résiduels. Après ajout de polyélectrolyte.
Alun	0,050	0,055
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$.	0,065	0,061
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$.	0,054	0,051

(TABLEAU 19).

* L'ajout de polyélectrolyte n'a aucune influence sur l'enlèvement du Fe ni d'Al résiduels.

L'objectif étant d'atteindre une teneur en Fe et en Al inférieure à 0,05 ppm

Les valeurs obtenues ne sont pas loin des normes et peuvent encore être réduites, après filtration.

CONCLUSION :

La quantité d'Al et de Fe résiduels est étroitement liée au pH de l'eau.

Sur l'eau de Keddara, l'emploi de polymères basiques nécessite l'ajout d'acide afin de baisser le pH jusqu'à une valeur inférieure à 7,5 de manière à minimiser la solubilité de l'Al et de faire tendre le pH vers la valeur d'équilibre.

F- INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU .

Afin de vérifier l'effet de la température sur l'efficacité du traitement de coagulation, (avec les 2 types de coagulants soit l'Alun et le PSBA, sur l'eau de Keddara) , nous l'avons fait varier lui donnant les valeurs suivantes :

3°C , 10°C , 18°C .

Les résultats obtenus justifient l'emploi de polymères basiques sur l'eau de Ste Yacinthe.

Les graphes 26a, 26b et 26c représentent l'évolution de la turbidité en fonction de la dose de coagulant injectée dans l'eau brute à des températures respectives de 3°C, 10°C et 18°C.

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS:

- La dose optimale d'Alun est comprise dans l'intervalle (0,11-0,13) meq+/l à toute température.
- La dose optimale de PSBA est comprise dans l'intervalle (0,07-0,08) meq+/l à toute température.

Tableau 20: "Calcul de la différence de dosages entre l'Alun et le PSBA pour une même turbidité résiduelle et à différentes températures."

Température de l'eau brute.	PSBA/ Alun.
3°C	0,076 / 0,13 = 0,58.
10°C	0,072 / 0,11 = 0,65.
18°C	0,080 / 0,11 = 0,72.
	MOY. = 0,58 + 0,65 + 0,72 / 3 ≈ 2/3.

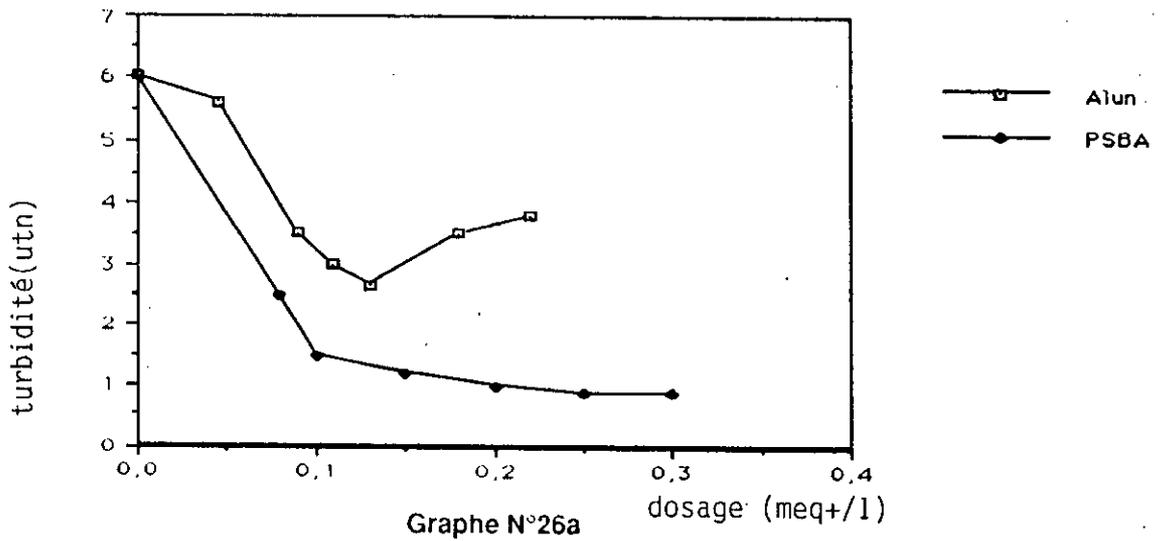
(TABLEAU 20).

Donc : Dose de PSBA = 2/3 Dose d'Alun .
(Pour une même efficacité finale et à toute température).

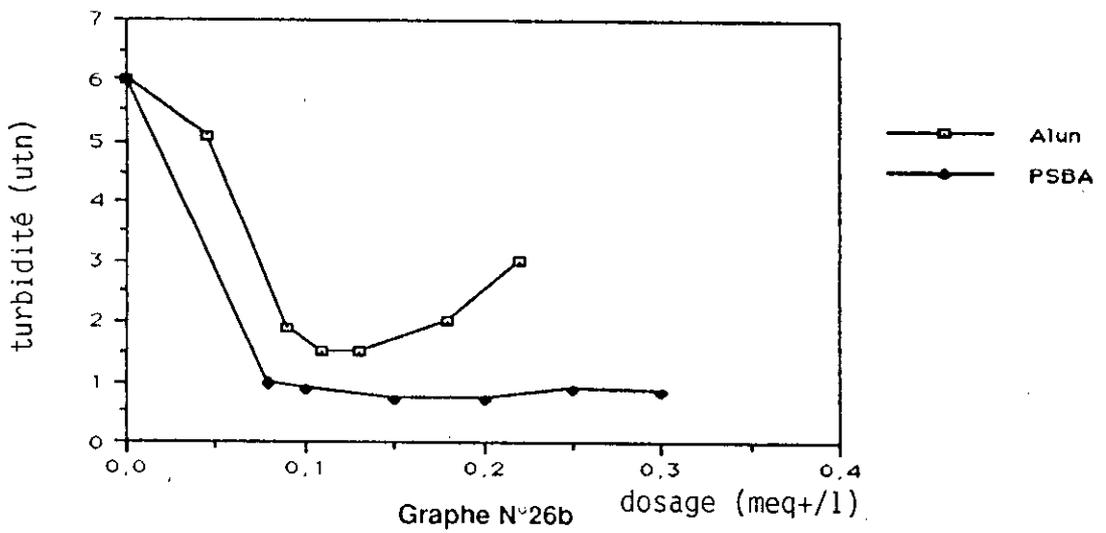
Tableau 21: "influence de la température de l'eau sur la turbidité minimale."

TEMPERATURE. °C.	Turbidité min. atteinte. Alun.	Turbidité min. atteinte. PSBA.
3°C	2,5	0,9
10°C	1,5	0,7
18°C	1,2	0,5

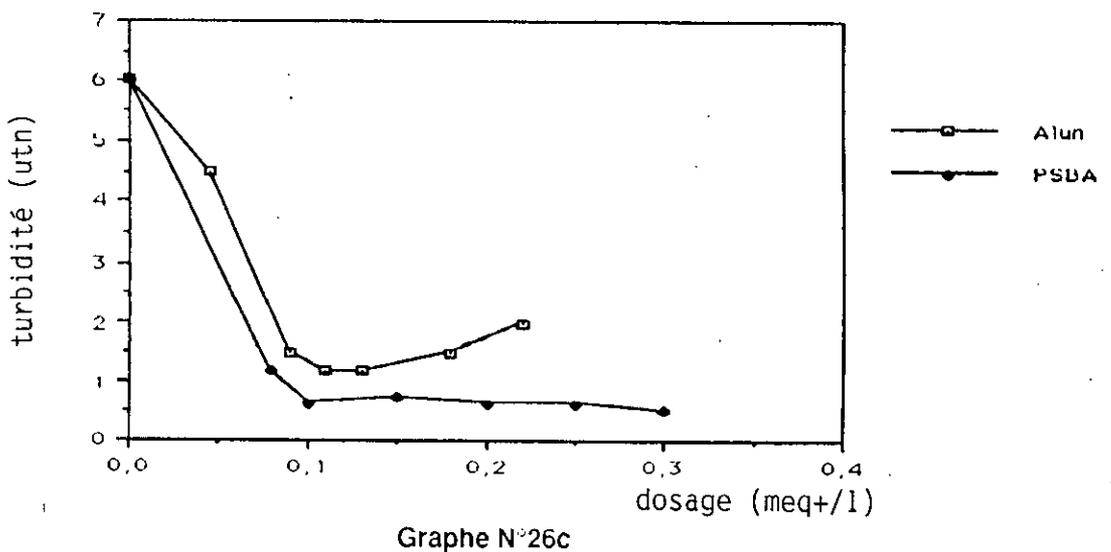
(TABLEAU 21).



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 3 °C (Barrage de Keddara)



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 10 °C (Barrage de Keddara)



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 18 °C (Barrage de Keddara)

- A basse température, le traitement par PSBA est plus efficace. Celui-ci donne une turbidité résiduelle inférieure à 1 NTU à toute température.

* En floculation péricinétique, le temps s'exprime comme suit :

$$t = 3 \mu / 4 \alpha K T n_0 .$$

Le temps de floculation est inversement proportionnel à la température. Donc : Une basse température exige une augmentation du temps de séjour (cas de l'Alun) afin de permettre une réaction complète et la formation de flocons décantables.

Ainsi à l'usine de traitement de Ste Yacinthe, le temps de séjours en hiver est-il augmenté de 1min à 3 ou 4 min. Par conséquent le débit d'eau à traiter est diminué.

Dans ce cas, afin de garder un débit journalier constant (durant toute l'année), on a dû alterner l'emploi de l'Alun associé au polyélectrolyte à celui du PASS. Celui-ci, permet d'obtenir une turbidité finale inférieure à 1 NTU sans prolongement du temps de séjours, ce qui a permis le passage d'une production de 70 000 m³/j à 110 000 m³/j en hiver.

G- INFLUENCE DU GRADIENT DE VITESSE EN PHASE DE MELANGE RAPIDE.

Sous forte agitation l'injection de coagulant dans l'eau est une étape très importante vue la rapidité des réactions.

Dans le but d'évaluer l'influence du gradient de vitesse sur les deux principaux mécanismes de coagulation, nous avons favorisé les conditions de réalisation du mécanisme:

"sweep coagulation", (En référence au diagramme d'AMIRTHARAJAH):

Utilisation de sulfate d'Al.

Turbidité de l'eau brute = 15 NTU. (par ajout de bentonite naturelle) .

pH final de la solution = 7,5 (après ajout de NaOH).

Dosage requis= 30 mg d'Alun/l

Pour la réalisation du mécanisme compression- adsorption - neutralisation, nous avons utilisé le PSBA mûré pendant 1 heure.

Les graphes 27 et 28 donnent les turbidités résiduelles en fonction du temps de décantation sur une période d'une heure à différentes vitesses de rotation : 100 tr/min - 150 tr/min - 200 tr/min.

Les gradients de vitesse (G) correspondants sont respectivement :

78,92 - 145,00 - 223,23 (s⁻¹)

G est calculé comme suit :

$$G = \sqrt{P / \mu \cdot v}$$

$$v = 1 \text{ litre;}$$

$$\mu = 1,14 \cdot 10 \text{ Pa.s.}$$

$$P = (0,75 \cdot 2\pi \cdot N)^2 \cdot Ct \cdot \rho \cdot Z \cdot R^4 / 4;$$

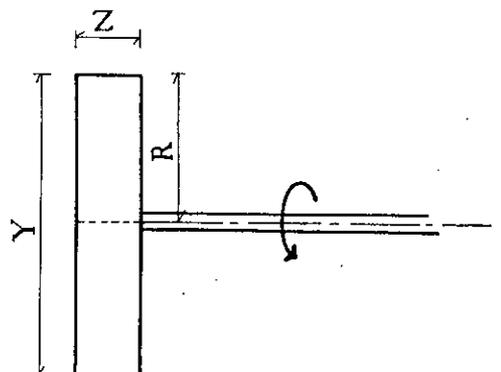
$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3;$$

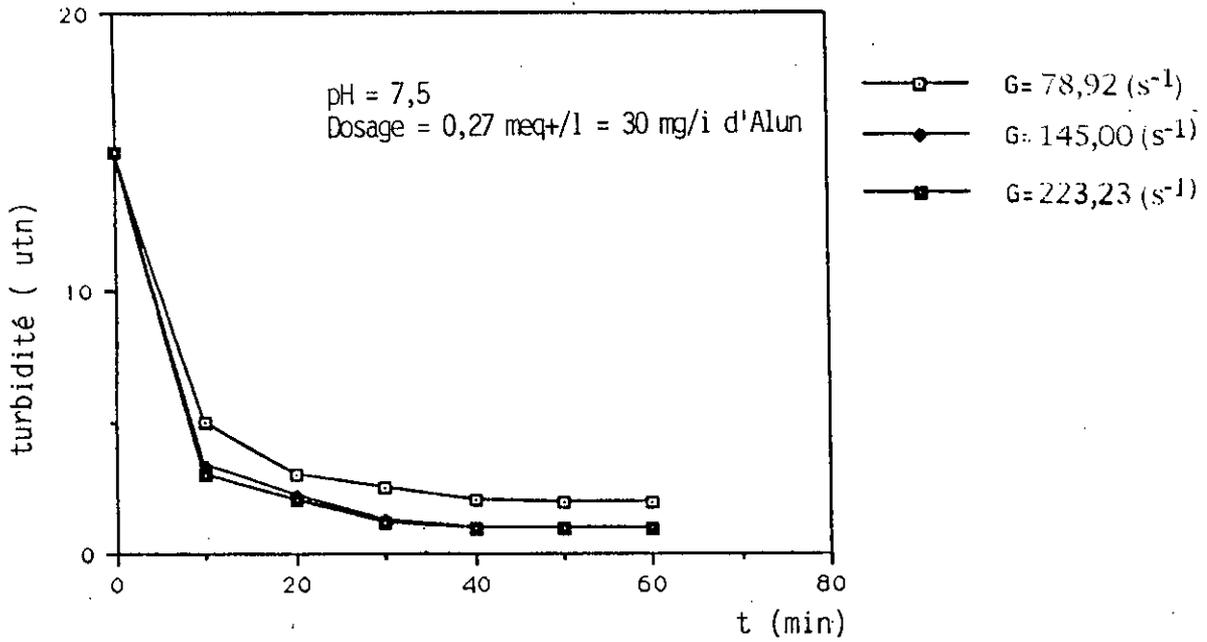
$$Z = 1,5 \text{ cm.}$$

$$R = 8,5/2 \text{ cm.}$$

$$Y/Z = 8,5/1,5 = 5,66 \Rightarrow Ct = 1,2;$$

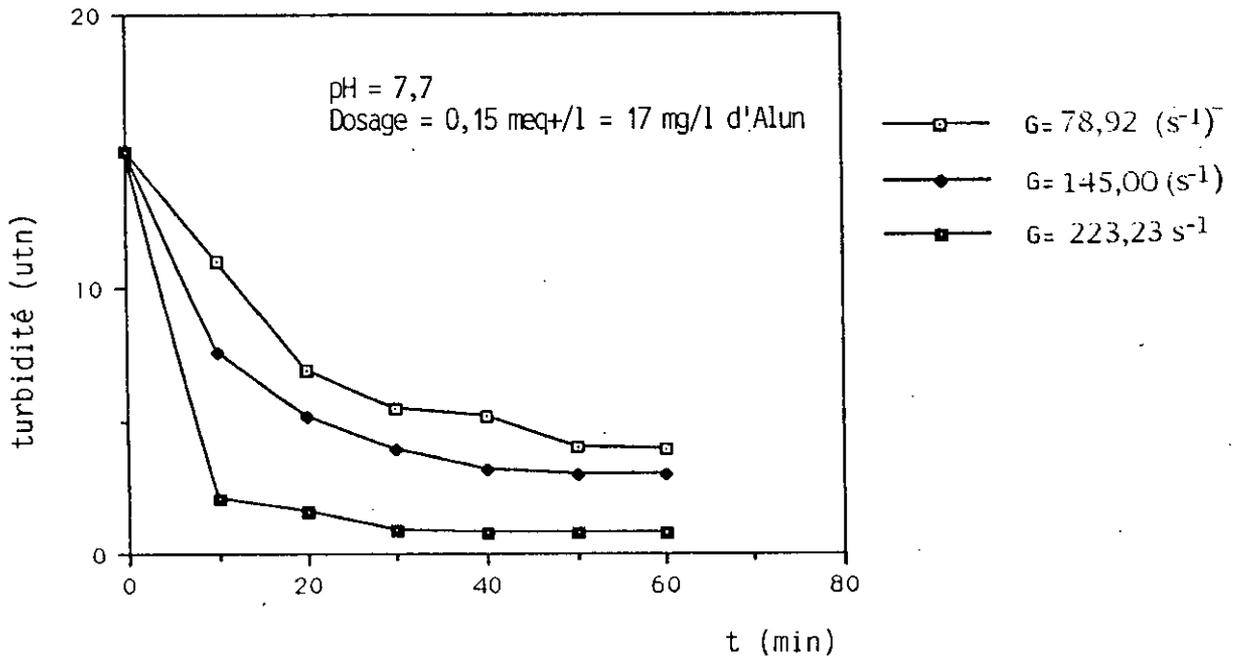
$$N = 100/60 \text{ tr/s, } 150/60 \text{ tr/s, } 200/60 \text{ tr/s.}$$





Graphe N°27

Evolution de la turbidité en fonction du temps de décantation et du gradient de vitesse en mécanisme de "Sweep coagulation" (Barrage de Keddara)



Graphe N°28

Evolution de la turbidité en fonction du temps de décantation et du gradient de vitesse en mécanisme de compression-adsorption-neutralisation (Barrage de Keddara)

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

- D'après les courbes 27 et 28 l'intensité du gradient de vitesse pendant le mélange rapide influe fortement sur l'efficacité du traitement par adsorption-neutralisation (Utilisation du PSBA).

Cette différence est visible surtout à partir de : $G = 223,23$ ($N = 200$ tr / min).

- dans le cas de la coagulation par mécanisme d'optimum sweep (graphe 29) cette différence n'est pas significative.

Ces résultats confirment effectivement la théorie de la cinétique des réactions de l'Al dans l'eau.

CONCLUSION :

Le gradient de vitesse joue un rôle essentiel dans le traitement de coagulation. Il intervient durant la phase rapide du mécanisme d'action d'adsorption-neutralisation.

L'utilisation des sels prépolymérisés doit donc se faire par mélange énergétique favorisant le contact entre particules et polymères. d'une part et la dispersion du réactif dans le liquide d'autre part.

Ainsi est évitée la déperdition du coagulant sous forme précipitée.

Remarque :

Dans les jar-tests, nous avons adopté en première phase une vitesse de rotation de 200 tr/min.

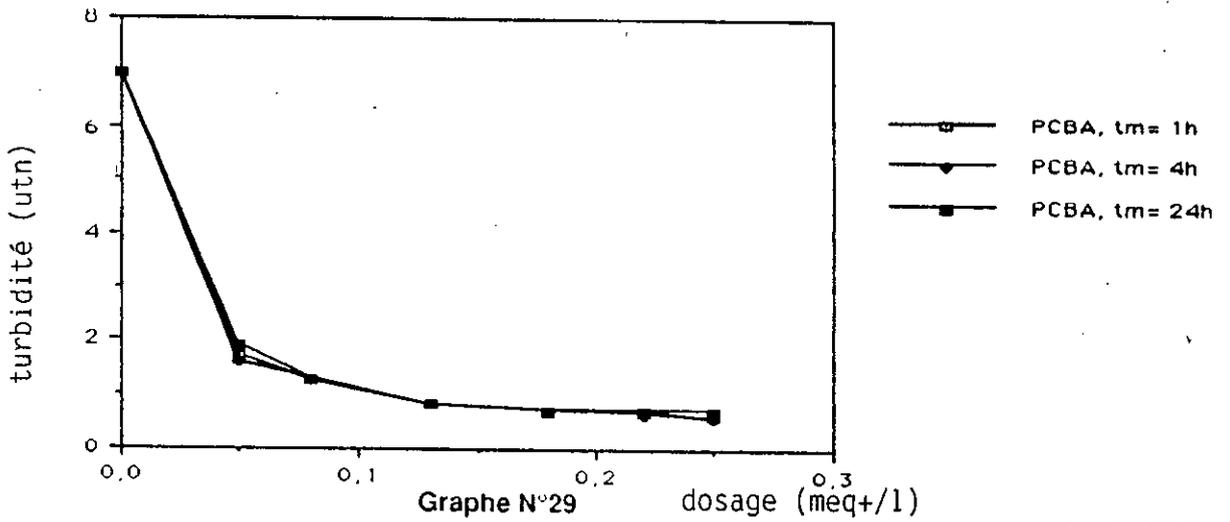
Vitesse qui favorise le contact rapide entre les 2 types de coagulant et les particules.

H- INFLUENCE DU TEMPS DE MATURATION SUR L'EFFICACITE COAGULANTE DES POLYMERES BASIQUES.

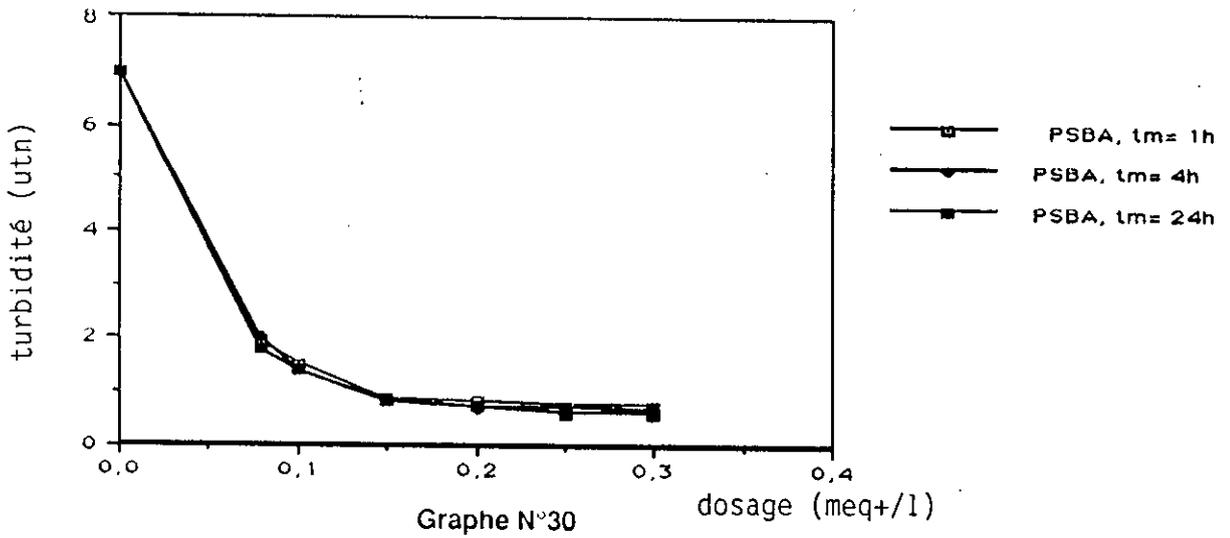
La différence entre les produits polymérisés industriels et ceux préparés en laboratoire réside en la rigidité de structure des premiers qui peuvent se présenter sous forme de poudre ou sous forme de solution concentrée ,(dont il faut éviter la dilution avant injection).

Les produits préparés en laboratoire (sur place par l'exploitant) ont l'avantage d'être modulés en fonction de l'eau à traiter et sont utilisés après un court temps de maturation. Celui -ci peut influencer l'efficacité coagulante. Nous l'avons évaluée en mesurant la turbidité résiduelle de l'eau dans un intervalle de 24 heures.

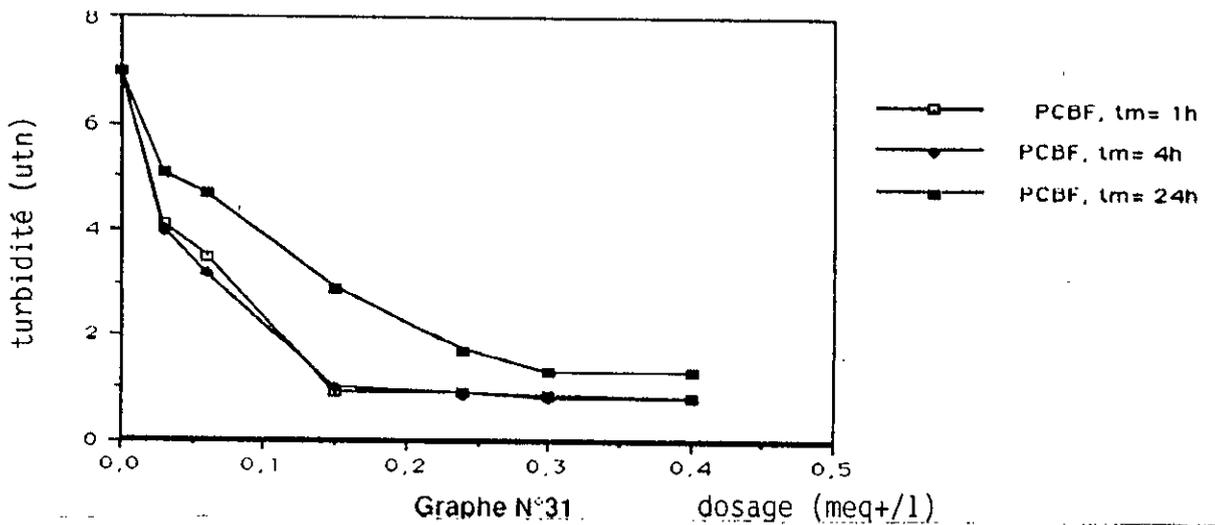
Les graphes 29 , 30 et 31 représentent l'évolution de la turbidité en fonction du temps de décantation à différentes valeurs du temps de maturation avec respectivement : PCBA, PSBA et PCBF .



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PCBA (Barrage de Keddara)



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PSBA (Barrage de Keddara)



Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PCBF (Barrage de Keddara)

OBSERVATIONS ET INTERPRETATIONS :

- Pour un temps de maturation de 1 à 24 heures, l'efficacité du PCBA, ($r = 2,5$), se stabilise . Au delà de 24 h, elle a tendance à décroître.
- Avec le PSBA, ($r = 1,5$), l'efficacité coagulante évolue faiblement.
- Avec le PCBF, ($r = 2,0$), l'efficacité coagulante stagne durant les premières heures de maturation puis commence à décroître.

*Les polymères induits dans la coagulation présentent la forme qui précède de peu la formation finale du $Me(OH)_3$ insoluble. Ils sont susceptibles de précipiter par hydrolyse en un temps très court.

CONCLUSION :

Dans nos expériences, l'emploi de ces solutions traitantes se fait après un temps de maturation d'une heure. Opération facile à intégrer dans le fonctionnement général de l'usine de traitement de l'eau potable. Elle permet en outre l'utilisation rapide des solutions préparées. Un temps de vieillissement supérieur à ce délai nécessiterait des installations supplémentaires de stockage (maturation) encombrant la chaîne de traitement sans améliorer leur efficacité coagulante.

I - ETUDE ECONOMIQUE .

Le choix du coagulant doit tenir compte en plus de son efficacité, de son coût ainsi que de la facilité de manipulation.

Les coagulants les plus utilisés en Algérie, sont :

l'Alun ou le $FeCl_3$ associés au polyélectrolyte.

L'utilisation des polymères basiques industriels (PAC, PAS) reste localisée dans certains pays. Au contraire les produits modulables (PCBA, PSBA, PCBF) peuvent être facilement préparés et utilisés sur place.

L'estimation du coût global du traitement ne prend pas en considération les frais de fabrication des coagulants :

Le petit matériel que nous avons utilisé (pompe péristaltique et agitateurs, bain thermostaté) ne peut faire l'objet d'une estimation financière servant de base de calcul à une étude économique à l'échelle d'une usine.

Evaluation du coût de traitement de chaque coagulant :

1- Hypothèses :

- Volume d'eau à traiter = 1 m^3 .
- Doses requises des coagulants = Celles assurant une même efficacité finale.
- Les prix unitaires des produits à l'état pur sont tirés de la nouvelle nomenclature de l'année 1993. (Tableau 22).

Tableau 22: Prix unitaires des produits à l'état pur: Nomenclature de l'année 1993

PRODUIT	Alun.	FeCl ₃ .	Polyélec trolyte.	NaOH.	Chaux. Ca(OH) ₂	Cl ₂ .	H ₂ SO ₄ .
PRIX. D.A/ kg	7,17	7,05	160,00	3,75	1,52	14,80	2,85

2 - Evaluation du coût de chaque coagulant :

- *Sulfate d'Al + polyélectrolyte* :

⇒ Dosage : 0,18 meq+/l d'Al (20 mg d'Alun) + 0,075 mg de polyélectrolyte.

⇒ Coût : $\{(20 \times 7,17) + (160 \times 0,075)\} \cdot 10^{-6}$

= 0,155 DA/ m³ d'eau .

- *FeCl₃ + polyélectrolyte* :

⇒ Dosage: 0,3 meq+/l de Fe (27,03 mg de FeCl₃ 6H₂O) + 0,1 mg de polyélectrolyte.

⇒ Coût : $\{(27,03 \times 7,05) + (160 \times 0,1)\} \cdot 10^{-6}$

= 0,206 DA/m³

- *PSBA* :

. 0,1 meq+/ l de PSBA (11,10 mg d'Alun) + NaOH

Quantité de NaOH contenue dans 0,15 meq+ d'Al du produit :

$r = \text{OH} / \text{Al} = 1,5 \Rightarrow (\text{OH}) = 1,5 \times (\text{Al}) = 1,5 \times 0,033 = 0,0495 \text{ mmole OH}^-$

0,0495 mole NaOH $\Rightarrow 0,0495 \times 40 = 1,98 \text{ mg de NaOH.}$

⇒ Dosage: 11,10 mg Alun + 1,98 mg NaOH.

⇒ Coût : $(11,10 \times 7,17 + 1,98 \times 3,75) \cdot 10^{-6}$

= 0,087 DA/m³

- *PCBF* :

. 0,15 meq+/l = 13,51 mg de FeCl₃ 6H₂O

quantité de NaOH contenue avec 13,51 mg/l de FeCl₃ 6 H₂O

$(\text{OH}) / \text{Fe} = 2 \Rightarrow \text{OH} = 2 \times (\text{Fe}) = 2 \times 0,049 = 0,098 \text{ mmole OH}^- \Rightarrow 3,92 \text{ mg NaOH.}$

⇒ Dosage: 13,51 mg FeCl₃ 6 H₂O + 3,92 mg NaOH.

⇒ Coût : $(13,51 \times 7,05 + 3,92 \times 3,75) \cdot 10^{-6} = 0,109 \text{ DA/m}^3 \text{ d'eau.}$

- *PCBA* :

Ce produit est préparé à partir de AlCl₃ dont le prix ne nous a pas été communiqué car non utilisé dans le traitement des eaux en Algérie. Cependant le calcul des quantités de produits intervenant a donné:

0,1 meq+/l (8,03 mg AlCl₃ 6 H₂O) + 3,28 mg NaOH.

- PASS :

Il s'agit d'un produit industriel dont l'utilisation demeure localisée bien que d'une efficacité incontestable.

Son prix en \$ Canadiens équivaut 2,5 fois le prix de l'alun. Son importation serait plus coûteuse que celle du sulfate d'Al associé au polyélectrolyte même employé à faible dose.

Tableau récapitulatif des coûts engendrés par chaque coagulant:

Coagulant	Dosage /l		Turbidité (UTN)	Dose en polyélectrolyte mg/l	quantité de NaOH mg/l	Coût total induit (DA/m ³)
	meq+	mg				
Alun	0,18	20,00	0,85	0,075	-	0,155
AlCl ₃	0,186	14,96	0,90	0,100	-	-
FeCl ₃	0,300	27,03	0,95	0,100	-	0,206
PSBA	0,10	11,10	0,90	-	1,98	0,087
PASS	0,06	6,66	0,80	-	-	-
PCBA	0,10	8,03	0,90	-	3,28	-
PCBF	0,15	13,51	0,95	-	3,92	0,109

(TABLEAU 23).

On en déduit les valeurs d'abattement du coût suivantes:

le PSBA par rapport aux sels de métaux (Alun, FeCl₃):

⇒ L'abattement est de l'ordre de : $(0,155 - 0,087) / 0,155 = 43,87 \%$
 et de : $(0,206 - 0,087) / 0,206 = 57,76 \%$

le PCBF par rapport aux sels de métaux (FeCl₃, Alun):

⇒ L'abattement est de l'ordre de : $(0,206 - 0,109) / 0,206 = 47,08 \%$
 et de : $(0,155 - 0,109) / 0,155 = 29,67 \%$

Remarque :

La chaux étant moins coûteuse que la soude son utilisation permet une réduction supplémentaire des frais.

Ex :

La préparation de PSBA à $r = 1,5$ nécessite :

Dosage : 11,10 mg d'Alun réagira avec 0,0495 mmoles de OH⁻ soit 1,69 mg de Ca(OH)₂.

⇒ Coût : $\{ (11,10 \times 7,17) + (1,69 \times 1,52) \} \cdot 10^{-6} = 0,082 \text{ DA/m}^3$.

⇒ L'abattement est de l'ordre de : $(0,155 - 0,082) / 0,155 = 47,09\%$.
soit un surplus de : $47,09 - 43,87 = 3,2\%$ par rapport au PSBA neutralisé par NaOH.

La préparation du PCBF à $r = 2$ nécessite:

$13,51 \text{ mg FeCl}_3 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O} + 3,62 \text{ mg Ca(OH)}_2$

⇒ Coût: $(13,51 \times 7,05 + 3,62 \times 1,52) 10^{-6}$
 $= 0,08 \text{ DA/m}^3$

⇒ L'abattement est de:

$0,206 - 0,08 / 0,206 = 61,16\%$

soit un surplus d'abattement par rapport au PCBF neutralisé par NaOH de:

$61,16 - 47,08 = 14,08\%$

Evaluation des bénéfices

Estimation du bénéfice réalisé par l'emploi du PSBA:

$0,155 - 0,087 = 0,068 \text{ DA/m}^3$

Pour un débit journalier de $300\,000 \text{ m}^3/\text{j}$, le gain sera:

$0,068 \times 300\,000 = 20\,400 \text{ DA/j}$.

Sur une période d'un an, le gain sera:

$20\,400 \text{ (DA)} \times 365 \text{ jours} = 7\,446\,000 \text{ DA/an}$.

A l'échelle nationale, le gain économique atteindra en une année l'ordre du milliard .

Conclusion:

Les polymères basiques préparés sur place par l'exploitant se révèle économiquement intéressant car permettant un gain en devise étrangères. (Importation de sulfate d'aluminium et polyélectrolyte).

VI - CONCLUSION GENERALE . PROPOSITIONS

La coagulation est un phénomène complexe. Son optimisation tient compte de plusieurs variables en interrelation, tels le pH, les sels dissouts, la température de l'eau, l'alcalinité, les conditions de mélange, la turbidité et la couleur.

Ces interrelations complexes interdisent actuellement toute approche théorique qui permet de prédire les concentrations optimales ainsi que le coagulant adéquat au traitement. Le jar-test reste le seul moyen de détermination du dosage optimal et le choix du coagulant.

Cependant, la recherche que nous avons effectuée dans le but d'améliorer le traitement de clarification, nous a permis de conclure ce qui suit:

1- Le phénomène de coagulation fait intervenir deux mécanismes principaux:

Sweep coagulation: (ou balayage) qui fait intervenir la formation de l'Hydroxyde $Me(OH)_3$. Le traitement avec les sels de métaux est généralement optimisé pour la réalisation de ce mécanisme permettant la formation de gros flocons.

Adsorption-neutralisation: Ce mécanisme fait intervenir les espèces cationiques solubles. Leur formation est très rapide et tendent à s'hydrolyser rapidement à cause de leur instabilité intrinsèque.

Les polymères basiques sont des espèces polymériques solubles d'Al ou de Fe formées à partir de sels d'aluminium ou de fer préhydrolysés et prépolymérisés qui, une fois dans l'eau, assure le mécanisme de compression-adsorption-neutralisation.

2- Le choix du dosage optimal de coagulant est un compromis entre celui donnant la valeur minimale de turbidité et celui donnant la couleur la moins élevée.

L'eau du barrage Keddara est très peu colorée. L'optimisation du traitement se fait par rapport à l'enlèvement de turbidité le plus élevé.

L'eau de la rivière Sainte-Yacinthe est beaucoup plus colorée que turbide; Elle renferme dix fois plus de matières organiques que ne renferme le barrage de Keddara. L'objectif est de la débarrasser le plus efficacement possible des matières organiques.

3 - Les sels d'Al et de Fe agissent avec une même efficacité coagulante. Leur mécanisme d'action dépend du dosage et du pH final de l'eau. (diagramme d'AMIRTHARAJAH). Ce dernier doit être étroitement ajusté afin d'optimiser le mécanisme "sweep coagulation".

4 - Dans le mécanisme "sweep coagulation" l'action coagulante des sels d'Al et de Fe est plus efficace sur une eau à forte turbidité. Celle-ci joue le rôle de noyau dans la formation du floc : Cas de l'eau de Ste Yacinthe où la turbidité finale atteinte est inférieure à 1 UTN sans ajout de polyélectrolyte.

L'eau du barrage Keddara étant pauvre en matières en suspension, la formation du floc s'y annonce difficile, et la turbidité finale n'atteint une valeur inférieure à 1 UTN qu'après ajout de polyélectrolyte.

5 - Un surplus de dosage en charges positives est enregistré avec les dérivés du Fe par rapport aux dérivés d'Al pour une même efficacité de traitement. Différence manifeste sur l'eau de Ste Yacinthe riche en matières organiques complexantes du Fe.

6 - L'hydroxyde de Fe forme un floc sur un intervalle de pH basique plus large que celui de l'hydroxyde d'Al. L'efficacité des sels de Fe est donc supérieure sur les eaux à pH élevé surtout concernant l'élimination de la couleur: cas de l'eau de Keddara.

7- L'enlèvement optimal de la couleur exige un dosage plus élevé que celui de l'enlèvement optimal de turbidité.

8- Le $FeCl_3$, donne un enlèvement de couleur moins efficace sur une eau à Ph acide (pH < 7) surtout si l'eau est fortement colorée (riche en matières organiques): cas de l'eau de Sainte-Yacinthe.

9- La différence de comportement entre coagulants est due à leur différence de propriétés ou à leurs anions correspondants. EX: Les ions sulfate accélèrent la précipitation des éléments de turbidité, et freinent celle des matières organiques.

10- L'ajout de polyélectrolyte comme adjuvant aux sels de métaux a pour effet . D'améliorer l'élimination de la turbidité surtout sur une eau peu turbide, . Renforcer le floc et améliorer la décantation. L'amélioration de l'enlèvement des matières organiques est moins important.

11 - Sur l'eau du barrage de Keddara, l'Al résiduel semble être étroitement lié au pH de l'eau. Dans le cas d'utilisation des polymères d'aluminium, une élévation de l'Al résiduel est enregistrée du fait que le pH de l'eau reste élevé (pH > 7,5) ce qui nécessite l'ajout d'acide pour minimiser la solubilité de l'hydroxyde d'Al.

. Le fer résiduel est moins sensible au pH: L'hydroxyde de fer précipite sur une plus large plage de pH basique.

. La quantité d'Al ou de Fe résiduelle ne semble pas être influencée par la dose injectée initialement sur l'eau du barrage Keddara.

Il est à conclure que:

Bien que tout coagulant puisse être utilisé de façon optimale, les polymères basiques eux, présentent certains avantages sur leurs sels de métaux. Ceux-ci sont résumés comme suit :

a - Les dosages requis en élément Al ou Fe sont, pour une efficacité équivalente, inférieurs à ceux requis avec leurs sels d'origine.

Pour une eau peu turbide cette réduction est de l'ordre de 1/2 à 2/3. Elle diminue jusqu'au 3/10 et tend à s'annuler pour une eau chargée (notamment en matières organiques).

Cependant à partir des dosages optimaux enregistrés avec les sels de métaux, (dans le sens croissant), les polymères basiques réduisent plus efficacement la turbidité et les matières organiques aussi bien sur l'eau de Keddara que sur l'eau de Ste Yacinthe.

b - Les Aluns basiques sont plus avantageux dans le traitement des eaux à faible turbidité et COT notamment à faible température.

c - Le dosage optimal des polymères basiques est beaucoup moins sensible que celui des sels de métaux aux variations de qualité de l'eau.

d - La vitesse de sédimentation du floc est supérieure. Ce dernier est moins abondant et plus résistant. Ce qui prévoit une augmentation de la durée de vie des filtres.

e - Ces agents sont moins acides et consomment par conséquent moins d'alcalinité ce qui est avantageux pour les eaux peu alcalines. . Cela se traduit également par une moindre baisse de pH. Ils présentent une zone de pH d'opération plus étendue, ce qui épargne l'utilisation de produits correcteurs de pH.

f - Il semble logique que ces coagulants agissent selon la voie "E" par compression - adsorption - neutralisation et pontage. Ils sont donc plus efficaces sur les eaux faiblement turbide et à basse température.

g - L'élimination des matières organique est meilleure, et donc La présence de trihalométhane est minimisée.

h - Leur mécanisme d'action est sensible au gradient de vitesse (G) en phase de forte agitation. La valeur de G ne doit pas être inférieure à 223 s^{-1} sur l'eau du barrage Keddara.

i - Globalement, les coagulants polymérisés qu'ils soient industrialisés (PASS) ou fabriqués en laboratoire (PCBA, PSBA, PCBF), ont des performances semblables . Pour ces derniers, le temps de maturation supérieur à une heure ne donne aucune amélioration nette sur leur efficacité.

j - L'emploi des polymères basiques assure un gain technique car épargne l'ajout de correctifs de pH et celui du polyélectrolyte ou autre adjuvant de floculation, en jouant un rôle d'agent de pontage entre les particules colloïdales .

k-vu leur rapidité d'action coagulante, l'emploi des polymères basiques au Canada, se fait surtout en hiver où la température de l'eau atteint des valeurs inférieures à 3°C, pour pallier à la coagulation lente et incomplète de l'Alun et opérer l'usine à des débits proches de la capacité nominale.

l- En Algérie, l'emploi des polymères basiques semble prometteur pour nos eaux pauvres en matières en suspension et en matières organiques, permettant ainsi de diminuer les dosages de produits chimiques et la quantité de boues générés.

m- En dépit des avantages qu'ils présentent pour l'instant au Canada, les coûts des PAC et des PAS, sont loin d'être concurrentiels avec ceux de l'Alun, contrairement à ce qui se passe dans certains pays comme le Japon, les coûts sont tels que les économies réalisées peuvent atteindre 40%.

n- En Algérie, leur emploi donne en plus de l'intérêt technique, un intérêt économique considérable.

o- Dans les domaines d'épuration physico-chimique des eaux usées, les performances de ces produits sont encore mal connues:

Les eaux usées contiennent beaucoup de particules en suspension de grandes dimension et ne posent donc pas de problème de nucléation, d'autant plus que leur pH et leur alcalinité sont assez élevés.

Ils sont aussi très riches en matières organiques et davantage de matières en solution qui peuvent complexer le coagulant.

Des essais effectués en URSS sur les eaux usées municipales ont donné des résultats analogues avec l'Alun et avec les PAS, mais là encore, de même que dans les procédés industriels les résultats méritent d'être complétés.

p- Les diagrammes proposés par Amirtharajah, permet de prédire le mécanisme impliqué en fonction du pH et de la dose d'Alun ou de FeCl₃ ou inversement de choisir une zone de dosage convenable.

Des diagrammes semblables permettent de comparer l'étendue des zones d'efficacité des PAC et des PAS à celle de l'Alun.

A date, l'emploi des produits polymérisés en traitement d'eau demeure une pratique assez localisée. Il semble fort probable que l'emploi de ces produits se répandra rapidement. Ceci pour peu que des méthodes industrielles soient disponibles pour produire des Aluns basiques stables.

En Algérie, la préchloration et la post-chloration sont encore applicables dans la chaîne de traitement.

Pour minimiser la présence de THM dans l'eau finale, nous ne sommes pas en mesure de remplacer la chloration par l'ozonation ni d'introduire la filtration sur charbon actif biologique. Ceci nous a incité à recourir à un moyen plus accessible afin de minimiser l'enlèvement des matières organiques en remplaçant l'emploi du sulfate d'Al associé au polyélectrolyte par ces solutions traitantes PCBA, PSBA, PCBF, (vu que nos eaux sont peu chargées).

Ces solutions peuvent facilement être préparées sur place, à partir d'un sel d'Al ou de Fe neutralisé par la soude ou la chaux . De plus, cela ne nécessitera pas un gros investissement, ni des aménagements énormes. Au contraire, en plus d'un meilleur traitement, un gain technique et économique est assuré.

VII- ANNEXES .

1° - Normes OMS et algériennes concernant les eaux potables :

* Normes physico-chimiques :

Caractéristiques	Limite maximale acceptable.	Objectif.
COULEUR. (U.H).	15	< 15
GOUT.	-	Insipide.
ODEUR.	-	Inodore.
pH.	6,5 à 8,5.	-
TEMPERATURE. (°C).	15	< 15
TURBIDITE. (NTU).	4	< 1
CALCIUM. (mg/l)	200	-
MAGNESIUM. (mg/l).	150	-
CHLORURE. (mg/l).	600	< 250
SULFATE. (mg/l).	0,2	-
ALUMINIUM. (mg/l).	0,2	< 0,05
RESIDUS SECS. (mg/l).	2000	-
FER.(mg/l).	0,5	< 0,05

2°- Unités des paramètres étudiés :

PARAMETRE.	UNITES.
Dose de coagulant.	meq+ / l.
Dose de polyélectrolyte.	mg/l
Turbidité.	NTU
Absorbance.	-
TAC.	mg/l CaCO ₃
m.o.	mg O ₂ /l
Al ou Fe.	mg/l

3° - Essais effectués sur l'eau du barrage Keddara.

a- COAGULANT : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$: Solution mère= 100 gl;

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute
Dosage	0,09	0,13	0,18	0,22	0,27	0,31	0,00
Turbidité.	3,1	2,0	1,3	1,4	1,8	2,0	6,0
% Turb.	48,3	66,7	78,4	76,7	70,0	66,7	-
Absorbance.	0,06	0,03	0,02	0,01	0,015	0,02	0,04
% Abs.	*50,0	25,0	50,0	75,0	62,5	50,0	-
pH	7,55	7,42	7,37	7,32	7,27	7,17	8,00
TAC	134	132	128	128	124	120	141
m.o.	2,50	2,40	1,87	1,87	1,90	2,20	2,60
% m.o;	3,80	7,60	34,60	34,60	26,92	15,30	-
Al	0,091	0,088	0,051	0,050	0,059	0,063	0,000

* % d'augmentation .

b - COAGULANT : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$: 0,18 meq+/l + polyélectrolyte.

	1	2	3	4	5	6	Eau brute
N° be-cher.							
Poly électrolyte	0,05	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	-
Turbidité.	1,00	0,85	0,85	0,87	0,88	0,90	6,00
% turb	83,33	85,83	85,83	85,50	85,33	85,00	-
Absorbance.	0,011	0,010	0,009	0,009	0,009	0,010	0,040
% Abs	72,5	75,0	77,5	77,5	77,5	75,0	-
pH	7,40	7,42	7,44	7,43	7,44	7,44	8,00
m.o.	1,40	1,30	1,30	1,30	1,35	1,40	2,10
% mo	33,4	38,0	38,0	38,0	35,7	33,4	-
Al	0,074	0,084	0,061	0,055	0,060	0,071	-

c - COAGULANT : $AlCl_3 \cdot 18 H_2O$: Solution mère= 100 g/l.

N° be- cher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute
$AlCl_3$	0,062	0,124	0,186	0,248	0,310	0,372	0,000
Turbi- dité.	3,5	1,5	1,2	1,4	1,4	1,8	6,0
% turb	41,66	75,00	80,00	76,70	76,70	70,00	-
Absor- bance.	0,029	0,020	0,012	0,010	0,011	0,019	0,040
% Abs	27,5	50,5	70,0	75,0	72,5	52,5	-
pH.	7,66	7,56	7,54	7,45	7,37	7,27	8,00
TAC	139,2	134,0	132,0	130,0	128,0	124,0	144,0
m.o.	2,2	1,7	1,6	1,7	1,7	2,0	2,4
% mo	8,30	29,16	33,40	29,16	29,16	16,67	-
Al	0,092	0,081	0,065	0,069	0,069	0,070	0,000

d - COAGULANT : $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$: 0,186 meq+/l + polyélectrolyte.

	1	2	3	4	5	6	Eau brute
N° be-cher. Poly-électrolyte	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	-
Turbidité.	1,10	1,00	0,90	0,90	0,95	1,20	6,00
% turb	81,70	83,40	85,00	85,00	84,16	80,00	-
Absorbance	0,009	0,010	0,009	0,009	0,010	0,010	0,040
% Abs	77,5	75,0	77,5	77,5	75,0	75,0	-
pH	7,58	7,57	7,58	7,58	7,58	7,58	8,00
m.o.	1,40	1,35	1,30	1,30	1,40	1,40	2,00
% mo	30,0	32,5	35,0	35,0	30,0	30,0	-
Al	0,070	0,062	0,061	0,074	0,062	0,062	0,000

e - COAGULANT : FeCl₃: Solution mère= 100 gl.

N° be- cher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute
FeCl ₃	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,00
Turbi- dité.	1,6	1,5	1,4	1,2	1,3	1,4	6,0
% turb	73,4	75,0	76,7	80,0	78,4	76,7	-
Absor- bance.	0,070	0,015	0,011	0,008	0,008	0,009	0,038
% Abs	*84,20	60,50	71,00	78,94	78,94	76,30	-
pH	7,62	7,52	7,41	7,37	7,29	7,28	8,00
TAC	138	132	130	128	126	124	144
m.o.	2,20	2,20	2,00	1,65	1,65	1,70	2,60
% mo	15,38	15,38	23,00	36,53	36,53	34,61	-
Fe	0,070	0,067	0,067	0,054	0,060	0,061	0,020

f -COAGULANT : FeCl3 6 H2O: 0,3 meq+/l + Polyélectrolyte;

	1	2	3	4	5	6	Eau brute
N° becher. Poly-électrolyte	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	-
Turbidité.	1,30	1,20	0,95	0,93	0,90	1,00	6,00
% turb	78,40	80,00	84,16	84,50	85,00	83,40	-
Absorbance.	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009	0,009	0,038
% Abs	76,31	76,31	78,94	78,94	76,31	76,31	-
pH	7,38	7,38	7,37	7,38	7,38	7,38	8,00
m.o.	1,45	1,40	1,40	1,40	1,50	1,50	2,30
% mo	36,95	39,13	39,13	39,13	34,78	34,78	-
Fe	0,058	0,054	0,052	0,052	0,058	0,058	0,020

h - Solution traitante : PSBA: 0,1 M Al , r= 1,5.

N° be cher.	1	2	3	4	5	6	7	Eau brute.
PSBA	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	
Turbi- -dité. %	1,50	0,90	0,80	0,80	0,75	0,70	0,70	6,00
turb	75,00	85,00	86,70	86,70	87,50	88,33	88,33	-
Absor- -bance	0,015	0,013	0,012	0,008	0,007	0,007	0,007	0,040
% Abs	62,5	67,5	70,0	80,0	82,5	82,5	82,5	-
pH	7,91	7,80	7,70	7,66	7,64	7,61	7,60	-
TAC	142,0	140,8	140,0	139,2	138,0	138,0	137,6	144,0
m.o.	1,75	1,30	1,20	1,20	1,10	1,10	1,10	2,00
% mo	12,5	35,0	40,0	40,0	45,0	45,0	45,0	-
Al	0,330	0,283	0,276	0,241	0,210	0,200	0,220	0,000

i - Solution traitante : PASS.

	1	2	3	4	5	6	Eau brute
N° becher.							
PASS	0,06	0,08	0,12	0,16	0,22	0,27	-
Turbidité.	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	6,0
% turb	86,7	88,4	88,4	88,4	86,7	85,0	-
Absorbance.	0,008	0,007	0,007	0,006	0,007	0,008	0,04
% abs	80,0	82,5	82,5	85,0	82,5	80,0	-
pH	7,78	7,75	7,70	7,64	7,59	7,55	8,00
TAC	141	140	138	136	134	132	144
m.o.	1,45	1,45	1,40	1,50	1,50	1,80	2,60
% mo	44,0	44,0	46,0	42,3	42,3	30,0	
Al	0,188	0,183	0,175	0,181	0,205	0,211	0,000

j - Solution traitante : PCBA: 0,1M Al , r= 2,5.

N°be cher.	1	2	3	4	5	6	7	Eau brute
PCBA	0,05	0,08	0,13	0,18	0,22	0,25	0,30	0,00
Turbi dité.	1,50	1,00	0,75	0,65	0,60	0,60	0,70	6,00
% turb	75,00	83,40	87,50	89,16	90,00	90,00	88,40	-
Absor bance	0,019	0,012	0,007	0,006	0,005	0,005	0,005	0,040
% Abs	52,5	70	82,5	85,0	87,5	87,5	87,5	-
pH	7,98	7,97	7,92	7,89	7,88	7,85	7,85	8,00
TAC	144,0	144,0	142,0	142,0	142,0	141,6	141,6	144,0
m.o.	1,8	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,3	2,4
% mo	25,0	37,5	41,66	41,66	50,00	50,00	45,84	-
Al	0,325	0,300	0,280	0,260	0,240	0,240	0,260	0,000

j - Solution traitante : PCBF: 0,1M Fe, r= 2.

N° be- cher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute
PCBF	0,03	0,06	0,15	0,24	0,30	0,40	0,00
Turbi- dité.	3,50	3,10	0,95	0,80	0,80	0,90	6,00
% turb	41,66	48,40	84,16	86,76	86,70	85,00	-
Absor bance.	0,010	0,010	0,006	0,006	0,006	0,007	0,038
% Abs	73,68	73,68	84,20	84,20	84,20	81,50	-
pH	7,91	7,87	7,85	7,80	7,72	7,70	-
TAC	142,0	140,8	140,8	140,0	138,0	138,0	144,0
m.o.	2,4	2,4	1,4	1,3	1,4	1,6	2,6
% mo	7,60	7,60	46,15	50,00	46,15	38,46	-
Fe	0,070	0,080	0,065	0,067	0,064	0,062	0,020

Etalonnage: Absorbance à 373,4 nm = fonction du degré Hazen

Degré de couleur en unité Hazen	Absorbance à $\lambda = 373,4$ nm
70	0,076
55	0,058
40	0,04
30	0,024
20	0,012
15	0,01
10	0,008
5	0,007
< 5	< 0,007

4° - Essais effectués sur l'eau de la rivière Ste-Yacinthe :

a - COAGULANT : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ (Alun).

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute
Alun	0,201	0,505	0,808	1,110	1,510	2,520	0,000
Turbidité.	4,4	0,6	0,7	1,2	2,5	4,3	21,0
% turb	79,04	97,14	96,70	94,28	88,09	79,52	-
Absorbance.	0,220	0,080	0,060	0,065	0,090	0,130	0,460
% Abs	52,17	82,60	86,95	85,86	80,43	71,73	-
pH	6,8	6,4	6,1	5,6	4,5	4,0	7,0
TAC	54	38	26	12	2	2	68

b- COAGULANT : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$: 0,808 meq+/l + Polyélectrolyte :

N° becher	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
Poly-électrolyte	0,072	0,192	0,240	0,312	0,432	0,480	-
Turbidité.	1,00	0,60	0,65	0,45	0,50	0,75	21,00
% turb	95,23	97,14	96,90	97,85	97,61	96,42	-
Absorbance;	0,04	0,038	0,038	0,038	0,038	0,039	0,260
% Abs	84,60	85,38	85,38	85,38	85,38	85,00	-
pH	6,00	5,91	5,90	5,90	5,89	5,89	7,00

c - COAGULANT : Coagulant: $AlCl_3 \cdot 6H_2O$: Solution mère: 100g/l.

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
$AlCl_3$	0,248	0,500	0,750	1,370	1,860	3,100	0,000
Turbi- dité.	13,0	0,7	0,7	2,2	3,2	3,2	21,0
% turb	38,09	96,66	96,66	89,52	84,76	84,76	-
Absor bance.	0,360	0,045	0,020	0,030	0,090	0,095	0,260
% Abs	38,46	82,60	92,30	88,00	65,38	63,46	-
pH	6,6	6,2	5,8	5,2	4,2	3,9	7,1
TAC	56,0	48,0	36,0	12,0	0,3	0,2	66,0

d - COAGULANT : $AlCl_3 \cdot 6H_2O$: 0,75 meq+/l + Polyélectrolyte.

N° becher	1	2	3	4	5	6	Eau brute
Poly-élec-trolyte	0,072	0,192	0,240	0,312	0,432	0,480	-
Turbidité	0,50	0,40	0,45	0,40	0,50	0,60	21,0
% turb	97,61	98,09	97,85	98,09	97,61	97,14	-
Absorbance.	0,039	0,020	0,023	0,030	0,030	0,039	0,260
% Abs	85,00	92,30	91,15	88,46	88,46	85,00	-
pH	6,20	6,21	6,20	6,20	6,20	6,20	7,00

e - COAGULANT : $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$: Solution mère: 100 g/l

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
$FeCl_3$	0,360	0,505	0,808	0,923	1,292	2,210	0,000
Turbidité	13,0	7,0	0,7	0,7	0,9	17,0	21,0
% turb	38,09	66,70	96,70	96,70	95,71	19,04	-
Absorbance.	0,660	0,450	0,089	0,070	0,099	1,400	0,240
% abs	*175	*87	62,7	70,8	58,7	*483,3	-
pH	6,30	6,20	6,05	5,90	5,00	3,10	7,10
TAC	50	42	24	16	3	0	70

"*" = % d'augmentation

f - COAGULANT : $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$: 0,92 meq/l + Polyélectrolyte.

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
Poly-élec-trolyte	0,072	0,192	0,240	0,312	0,432	0,480	-
Turbidité	0,60	0,60	0,50	0,50	0,55	0,60	21,00
% turb	97,14	97,14	97,61	97,61	97,38	97,14	-
Absorbance.	0,049	0,050	0,045	0,049	0,049	0,049	0,240
% Abs	79,38	79,16	81,25	79,58	79,58	79,58	-
pH	5,80	5,80	5,75	5,80	5,80	5,80	7,00

h - Solution traitante : PASS.

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
PASS	0,360	0,505	0,808	1,000	1,500	2,000	0,000
Turbidité.	1,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	21,0
% turb	91,90	97,61	98,09	98,09	98,09	98,09	-
Absorbance.	0,180	0,090	0,020	0,011	0,001	0,000	0,240
% abs	25,00	62,50	91,66	95,41	99,58	100,00	-
pH	6,69	6,65	6,60	6,41	6,25	6,00	7,00
TAC	60	58	52	47	34	26	70

i - Solution traitante : PASS : 0,808 meq+/l + Polyélectrolyte.

N° becher.	1	2	3	4	5	6	Eau brute.
Poly-élec-trolyte	0,072	0,192	0,240	0,312	0,432	0,480	-
Turbidité.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	21,0
% turb	97,61	97,51	97,61	97,61	98,09	97,14	-
Absorbance.	0,039	0,029	0,020	0,020	0,035	0,040	0,240
% Abs	83,75	87,91	91,66	91,66	85,41	83,40	-
pH	6,40	6,40	6,40	6,30	6,40	6,25	7,00

j - Solution traitante: PCBA: 0,1 M Al ; r= 2,5.

N° bec her	1	2	3	4	5	6	7	8	Eau brute
PCBA	0,36	0 505	0,808	1,000	1,500	2,000	2,100	2,400	-
Turbidité	0,70	0,30	0,30	0,20	0,15	0,15	0,15	0,20	21,00
%turbidité	96,70	98,57	98,57	99,00	99,28	99,28	99,28	99	-
Absorbance	0,085	0,060	0,030	0,025	0,021	0,019	0,016	0,019	0,18
%abs	52,77	66,66	83,33	86,11	88,33	89,44	91,11	91,11	-
pH	6,9	6,9	6,9	6,9	6,89	6,81	6,8	6,8	7,00
TAC	66	62	60	58	56	56	54	54	66

k - Solution traitante : PCBF: 0,1M Al , r= 2.

N° be- cher.	1	2	3	4	5	6	7	Eau brute.
PCBF	0,360	0,505	0,808	1,000	1,300	1,500	2,000	-
Turbi- -dité	5,70	5,60	3,20	1,80	0,50	0,30	0,15	-
% turb.	72,85	73,40	84,76	91,42	97,61	98,57	99,28	-
Absor bance	0,65	0,75	0,50	0,27	0,085	0,040	0,025	0,190
% Abs	*242	*2947	*163	*42°	55,26	78,94	86,84	-
pH	6,90	6,80	6,70	6,61	6,51	6,41	6,21	7,00
TAC	58	56	51	46	40	38	30	66

5° - Essais effectués exclusivement sur l'eau du barrage Keddara :

* Variation de la température :

1- Température de l'eau brute= 3°C.

Alun	0,045	0,090	0,110	0,130	0,180	0,220	Eau brute.
Turbi- dité.	5,6	3,5	3,0	2,7	3,5	3,8	6,0
PSBA	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	Eau brute.
Turbi- dité	2,5	1,5	1,2	1,0	0,9	0,9	6,0

2 - Température de l'eau brute= 10 °C.

Alun	0,045	0,090	0,110	0,130	0,180	0,220	Eau brute.
Turbidité.	5,1	1,9	1,5	1,5	2,0	3,0	6,0
PSBA	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	Eau brute.
Turbidité	1,00	0,90	0,70	0,70	0,90	0,85	6,00

3- Température de l'eau brute = 18 °C.

Alun	0,045	0,090	0,110	0,130	0,180	0,220	Eau brute.
Turbidité	4,5	1,5	1,2	1,2	1,5	2,0	6,0
PSBA	0,08	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	Eau brute.
Turbidité.	1,2	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	6,0

* Variation du gradient de vitesse

1 - Coagulant : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$.

Turbidité de l'eau brute = 15 NTU.

Dosage de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$: 0,27 meq/l = 30 mg/l.

pH final = 7,5.

N = 100 trs/mn: G = 78,52 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité	15,0	5,0	3,0	2,5	2,0	1,9	1,9

N = 150 trs/mn: G = 115 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité	15,0	3,4	2,2	1,3	1,0	1,0	1,0

N = 200 trs/mn: G = 157,08 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité	15,0	3,0	2,0	1,2	1,0	1,0	1,0

2- Solution PSBA : 0,1 M AL, r = 1,5.

Turbidité de l'eau brute= 15 NTU.

Dose requise de PSBA= 0,15 meq+/l = 17 mg/l.

pH final = 7,7

N=100 trs/mn: G= 78,92 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité	15,0	11,0	7,0	5,5	5,2	4,1	4,0

N= 150 trs/mn: G= 145 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité	15,0	7,6	5,2	4,0	3,2	3,0	3,0

N=200 trs/mn: G= 223,23 (1/s)

t (mn)	0	10	20	30	40	50	60
Turbidité.	15,0	2,0	1,5	0,85	0,80	0,80	0,80

* Variation du temps de maturation

Turbidité de l'eau brute = 7 NTU
 pH " " " = 7,98

1- PCBA: 0,1 M Al ; r=2,5

PCBA	0,05	0,08	0,13	0,18	0,22	0,25
t.m.=1h Turbid.	1,70	1,25	0,80	0,71	0,70	0,70
t.m.= 4h Turbid.	1,60	1,30	0,80	0,70	0,65	0,60
t.m.= 24 h turbid.	1,90	1,30	0,80	0,70	0,70	0,70

2 - PSBA : 0,1 M Al , r= 1,5.

PSBA	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
t.m.=1h Turbid.	1,90	1,50	0,85	0,80	0,75	0,75
t.m.=4h. Turbid.	2,00	1,40	0,81	0,70	0,70	0,65
t.m.=24h Turbid.	1,8	1,4	0,8	0,7	0,6	0,6

3 - PCBF: 0,1 M Fe , r= 2.

PCBF	0,03	0,06	0,15	0,24	0,30	0,40
t.m.=1h turbid.	4,10	3,50	0,90	0,90	0,85	0,80
t.m.= 4h turbid.	4,00	3,20	1,00	0,90	0,80	0,80
t.m.=24 h turbid.	5,10	4,70	2,90	1,70	1,30	1,30

Liste des figures

- Figure 1: Dimensions des diverses particules présentes dans l'eau.
- Figure 2: Double couche et potentiel Zéta.
- Figure 3: Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules.
- Figure 4a: Les différentes espèces susceptibles d'intervenir dans la coagulation.
- Figure 4b: Les différents mécanismes susceptibles d'intervenir dans la coagulation.
- Figure 5 : Schéma des mécanismes réactionnels de la coagulation.
- Figures 6, 7, 7', 8 : Schémas explicatifs de la floculation ortho-cinétique.
- Figure 9 : Répartition de Al (III) en espèces monomériques et polymériques en fonction du Ph en solution concentrée (0,1M) et diluée (10^{-5} M) selon Baes et Mesmer (1976)
- Figure 10 : Représentation schématique de la structure de l'ion $(Al_7(OH)_4(OH)_2(H_2O)_{12})^{7-}$ selon Johansson(1960).
- Figure 11 : Transfert de l'eau
- Figure 12 : Diagramme fonctionnel de la station de traitement de Boudouaou
- Figure 13 : Diagramme schématique et opérationnel de la coagulation par Al(III). Amirtharajah 1982.
- Figure 14 : Diagramme schématique et opérationnel de la coagulation par Fe (III). PATRICH.N.Johnson & A.AMIRTHARAJAH.1983.

Liste des graphes

- Graphe 1: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Barrage Keddara).
- Graphe 2: Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction des taux de coagulants. barrage Keddara
- Graphe 3: Evolution de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte (Barrage Keddara)
- Graphe 4: Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte (Barrage Keddara)
- Graphe 5: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Rivière Sainte-Yacinthe).
- Graphe 6: Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Rivière Sainte-Yacinthe).
- Graphe 7: Evolution de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 8: Pourcentage d'élimination de la turbidité en fonction du dosage en polyélectrolyte.(Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 9: Evolution de l'absorbance en fonction des taux de coagulants (Barrage Keddara)
- Graphe 10: Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction des taux de coagulants . (Barrage Keddara)
- Graphe 11: Etalonnage de l'absorbance à $\lambda = 373,4$ nm en fonction du degré Hazen. (Barrage de Keddara)
- Graphe 12: Evolution de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte (Barrage de Keddara)
- Graphe 13: Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte. (Barrage de Keddara)
- Graphe 14: Evolution de l'absorbance en fonction des taux de coagulants (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 15: Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction des taux de coagulants. (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 16: Evolution de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte. (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 17: Pourcentage d'élimination de l'absorbance en fonction du dosage en polyélectrolyte. (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 18: Pourcentage d'élimination des matières oxydables par KMnO_4

en fonction des taux de coagulants (Barrage de Keddara)

- Graphe 19: Pourcentage d'élimination des matières oxydables par KMnO_4 en fonction du dosage en polyélectrolyte. (Barrage de Keddara)
- Graphe 20: Evolution du Ph en fonction des taux de coagulants (Barrage de Keddara)
- Graphe 21: Evolution du Ph en fonction des taux de coagulants (Rivière Sainte-yacinthe)
- Graphe 22: Evolution du TAC en fonction des taux de coagulants (Barrage de Keddara)
- Graphe 23: Evolution du TAC en fonction des taux de coagulants (Rivière Sainte-Yacinthe)
- Graphe 24: Evolution de l'aluminium et du fer résiduels en fonction des taux de coagulant. (Barrage de Keddara).
- Graphe 25: Evolution de l'aluminium et du fer résiduels en fonction du dosage en polyélectrolyte. (Barrage de Keddara)
- Graphe 26a: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 3°C . (Barrage de Keddara)
- Graphe 26b: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 10°C . (Barrage de Keddara)
- Graphe 26c: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants (Alun, PSBA) pour une température de 18°C . (Barrage de Keddara)
- Graphe 27: Evolution de la turbidité en fonction du temps de décantation et du gradient de vitesse en mécanisme de "Sweep coagulation" (Barrage de Keddara)
- Graphe 28: Evolution de la turbidité en fonction du temps de décantation et du gradient de vitesse en mécanisme de compression-adsorption- neutralisation. (Barrage de Keddara)
- Graphe 29: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PCBA. (Barrage de Keddara)
- Graphe 30: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PSBA. (Barrage de Keddara)
- Graphe 31: Evolution de la turbidité en fonction des taux de coagulants et du temps de maturation: Cas du PCBF. (Barrage de Keddara)

BIBLIOGRAPHIE .

- 1- Monique-Tardat-Henry (1984)
"Evolution des dérivés de l'aluminium utilisé comme agent coagulant ".
In : Sciences et techniques de l'eau. (S & T L). Vol. 22. N°4, nov. 1984.
- 2 - F. EDELINE (1984)
"Epuración physico-chimique des eaux: Theorie et technologie
Chapitre VI: Flocculation.
Tribune du Cebedeau. (T.C). N°493, 37, pp 536-552. fév, 1984.
- 3 - R. DESJARDINS (1988)
"Traitement des eaux ".
Ed. de l'Ecole Polytechnique de Montréal.
- 4 - J-P BEAUDRY. (1984)
" Traitement des eaux ".
Ed. Le Griffon d'Argile inc.
- 5 - CHING-JEY (James) Kuu and Gary L. AMY (1988).
"Factors affecting coagulation with aluminium sulfate II ".
In: Wat. Res. Vol. 22. N°7. pp 863 - 872. 1988.
- 6 - Wiesner. MR,P.MAZOUNIE. (1989)
"Row water characteristics and selection of treatment configuration
for particle removal ."
Journal AWWA . N°81. pp 80 - 89. 1989.
- 7 - HAARHOFF, J.J. CLEASBY (1988)
"Comparing aluminium and iron coagulant for in-line filtration of cold
water ".
j. AWWA. 80. pp 168 - 175. 1988.
- 8 - QURESHI, N, R.H. MALMBERG(1985)
"Reducing aluminium residuals in finished water ".
JAWWA. 77 (10). pp 101 - 108. 1985.
- 9 - A. AMIRTHARAJAH. - K.M. MILLS.(1982)
"Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation ".
J. AWWA. april 1982.
- 10 -DRISCOLL, CT, RD, LETTERMAN.(1988)
" Chemistry and fate of Al III in treated drinking water ".
J. ENV. ENG. 114 (1). pp 21 - 37. 1988.
- 11- SHAHIN REZANIA(1989)
"the occurrence and control of aluminium drinking water ".
University of North Dakota. aout 1989.
- 12-E. VAN BENSCHOTEN & . EDZWALD (1990).
"Measuring aluminium during water traitement".Methodolog and
application
J,AWWA. Research and Technology. May 1990.

- 13 - CHADIK PA GL. AMY.(1987).
 "Coagulation and adsorption of humic substances. Analysis of surrogate parameter for predicting effects on trihalomethane formation potential".
 ENV.techn. Let. 8 (6): 261. 268. Sciences & technology letters 23 March 1987.
- 14 -WEBER, W. J. AM. JODELLAH (1985).
 "Removing humic substances by chemical-treatment and adsorption
 JAWWA. 77 (4): 132-137. Avril 1985.
- 15 -JEKEL,MR (1986)
 "Interactions of humic acids and aluminium salts in the flocculation process".
 Wat.Res. 20 (21): 1535-1542 . 1986.
- 16 -"Chimie générale"(1981)
 R. OUAHAS; B. DEVALLEZ;
 2ème édition. OPU - SNED. 1981.
- 17 -F. FIESSINGER ET J. L. BERSILLON,(1977).
 "Prépolymérisation de l'hydroxyde d'aluminium pour la coagulation des eaux."
 Tribune du Cebedeau, n°399, fev. 1977.
- 18 - CARMEL Jolicoeur, PhD*, DIETER Haase, B.SC.(1989).
 "Les aluns basiques dans le traitement physico-chimique de l'eau: Survol de leur propriétés et évolution récente. "
 Sciences et techniques de l'eau, Vol 22, n°1, fév. 1989.
- 19 -HOUCK,B.A.ALEXANDER.(1984)
 "A process for each season".
 Water/Eng and Manag April 84. 44-48.
- 20 -DEMPSET.BA. R.M. GAHNO, CR. O'MELIA.A (1984).
 "The coagulation of humics substances by means of aluminium salts."
 J. AWWA. 76 (4): 141-150. 1984.
- 21 -DEHEK H. & STOL R.J. (1976).
 "Hydrolysis-precipitation studies of Al III solutions . 3. The role of the sulfate ion".
 J. colloid interface Sci. (J. C. I. S). N°64. pp 72 - 89. 1976.
- 22 - BOTTERO J.Y. & J.M; FIESSINGER & F. POIRIER(1980)
 "Studies of hydrolyzed aluminium chloride solutions".
 J.E 1980.
- 23 - VENTURINI M. & BERTHON. G.(1987).
 Aluminium speciation studies in biological fluids. A new investigation of aluminium hydroxyde".
 J. chem. soc. Dalton Trans. pp 1145 - 1148. 1987.
- 24 - L.L. CAMPBELL(1987)
 " Coagulation methods of aluminium salts".
 West CAN. Water and Wastewater Assn, 39 th, ann.Conf.Saskatoon, 21-23 oct 283-292. 1967.

- 25 - PATRICK.N. Johnson & A. AMIRTHARAJAH (1983)
"Ferric chloride and alum as single and dual coagulants".
J. AWWA . May 1983.
- 26- HAAASE. D & SPIRATOS. N.
Brevet US en instance . 1988
- 27 - J.P. BEAUDRY (1984)
" chimie des eaux".
Ed. Le griffon d'Argile inc. 1984;
- 28 -" La pratique des eaux".
Ed. du Moniteur. 1981.
- 29 - "Vade Mecum du chef d'usine de traitement destinée à la consommation."
Technique et documentation Lavoisier.(1987)
- 30 - P.J. MURPHY & A.M. POSNER & J.P. QIRK(1976)
" characterisation of partially neutralized ferric nitrate solutions".
J.C.I.S. Vol. 56. N°2. august 1976.
- 31 - J. DOUSMA & PL DE BRUYN(1979)
" Hydrolysis precipitation studies of iron solutions".
J.C.I.S. Vol. 72. N°2. nov. 1979.
- 32 - RAUSCH W. & BALE H.D(1964)
J. of Chem. Phys. N°40. 3891. 1964.
- 33 - " Etude de la performance de filtres à charbon actif biologique (CAB) en
eaux froides".
Présenté au Sumposium international sur les eaux usées .
Montréal- Canada. 20 -22 nov. 1989.
- 34 - MURPHY.P.J.POSNER, A.M.and KUIRK,J.P(1978)
" Characterization of partially neutralized ferric perchlorate solutions".
J. C. I. S. Vol. 64. N°1. March 15. 1978.
- 35 - F. FIESENGER(1976)
" La coagulation : errements anciens et connaissances nouvelles".
Société Lyonnaise des eaux et de l'eclairage.N°4-1976.
- 36 - Degrement(1976)
Memento technique de l'eau :
Ed. Degrement. Paris - 1976.
- 37 - Jean-B-SERODES et Alain SOUCY.(1975)
" Etude de la coagulation des eaux par fluométrie".
Canadian Journal of Civil Engineering. (C.J.C.E.). Vol.2. N°3. pp 253-261.
1975.
- 38 - P. THEBAULT (1978).
" Elimination des matières organiques et des micropolluants contenus dans
les eaux de surface : Rôle et efficacité des coagulants minéraux".
Thèse pour l'obtention du grade de Docteur Ingénieur. 3 Novembre 1978.

- 39 - J. FRIPIAT & J. CHAUSSIDON & A. JELLI.(1971)
 " Chimie physique des phénomènes de surfaces. Applications aux oxydes et aux silicates."
 Ed. Masson & Cie.1971.
- 40 - A. KETTAB. Doc. Ingénieur (1992).
 "Le traitement des eaux. Tome 1: Les eaux potables. Ed 1992
- 41 - CHING - JEY (JAMES) KUO.(1988).
 " Factors affecting coagulation with aluminium sulfate I ".
 Wat. Res. Vol.22. N°22. pp 853 - 862. 1988
- 42 - F. RIOPEL. Département de Génie Civil . E. P. Montréal(1989).
 "Influence de la chloration sur la formation des THM et la coagulation-floculation en eau chaude".
 Rapport de projet présenté en vue de l'obtention du grade de maîtrise en ingénierie . oct. 1989.
- 43 - A. KETTAB (1981).
 " Le traitement des eaux potables en Algérie ^par les polymères basiques d'aluminium".
 Séminaire national.
- 44 - A. GILLES & M. et M. BOSISIO(1989).
 " Etude comparative des performances de 2 coagulants :
 le sulfate d'Al (Alun) et le polyaluminium - silicate - sulfate (PASS)".
 In : S.T.E. Vol. 22. N°4. nov. 1989.
- 45 -Y. RICHARD - J. POIRIER - J. L BERSILON.(1979).
 " Le PCBA, un an d'exploitation industriel en préparation d'eau potable à Viry-Châtillon."
 L'eau et l'industrie 34 p. 29. 1979.
- 46 - S. N° DIONGUE. (1988).
 " Effet combiné de la préoxydation de la coagulation et de la décantation sur les caractéristiques d'une eau".
 E.P. Montréal 1988.
- 48 - FIESSINGER. - J.E. POIRIER. J.Y. BOTTERO. - J.M. CASES - F(1980)
 "hydrolyse des solutions aqueuses de chlorure d'aluminium et efficacité dans la coagulation des colloïdes minéraux."
 J. Phys. Chem. U.S.A 1980.
- 49 -THOMAZEAU.(1981)
 " Station d'épuration: Eaux potables et les eaux usées."
 Chap. 10: Traitement physico - chimique
- 50 -ECKENFELDER(1982)
 "Gestion des eaux usées urbaines et industrielles-Characterisation techniques d'épuration, aspect économique
 Chap. 2 : " Floculation - décantation"
 Documentation lavoisier.1982.
- 51- A. WEERENS. Dr.Sc. (1974).
 " La floculation : principes et applications".

- 52 - J.E POIRIER - F. FIESSINGER(1980)
 "Relation entre la taille et la densité des flocons formés lors d'un traitement de coagulation - floculation par le polychlorure basique d'Al".
 T.S.M. L'eau. Mars 1980.
- 53 - G. DESBOS - C. LAPLACE.(1990)
 "Floculation économique d'une eau par création d'une phase de coagulation prolongée".
 In : Revue Tribune de l'eau. (T.E). Vol 42 N° 542 Mars 1990.
- 54 - R. D. LETTERMAN(1985)
 "Modeling the effects of hydrolysed aluminium and solution chemistry on floculation kinetics".
 American chemical Society. (A.C.S.) - 1985.
- 55 - T. VIRARAGHAVAN - CH; WIMMER(1988)
 "Polyaluminium chloride as an alternative to Alum coagulation - A case study".
 J.AWWA N°6. pp 316 - 321. 1988.
- 56 - P. DOLJS (1983).
 "Interaction of temperature, alkalinity and Alum dose by coagulation of humic water."
 Institute of Ecology. C Zechoslovak Academy of sciences.
 Tzechoslovakia (1983).
- 57 - Rong - jin LEU & MRIGANKA M. GHOSH(1988)
 " Polyelectrolyte characteristics and floculation ".
 J. AWWA. April. 1988.
- 58- APHA, AWWA, WPCF (1985)
 "Standard Methods for the Examination of Water and Wastwater"
 16^e édition. Washington, 1985.
- 59- J.CROWTHER&J.EVANS(1981)
 "Estimating color in Hazen units by spectrophotometry."
 J. AWWA MAY 1981.
- 60 - A.k. Zapol'skù. L.I. PANCHENKO(1987).
 " Coagulation properties of aluminium - hydroxy-salts of various basicity;"
 Khimia i Technologia Vody. Vol 9 n°2 pp 130-134. (1987).
- 61 - ohn E. TOBAISON & charles R.O'MELIA(1988)
 " Physico - chemical aspects of particle removal in depth filtration."
 J.AWWA. déc. 1988.
- 62- A.K.ZAPOL'SKII(1984)
 "Technology of water conditioning and demineralization."
 Khimiya i technologia Vody. Vol 6. n°2 pp 130-134. (1984).
- 63 - V.A.MHAISALKAR, R.PARAMASIVAM.and A.G.BHOLE(1991)
 "Optimising physical parameters of rapid mix design for coagulation-floculation of turbid waters."
 Wat Res Vol 25 n°1 pp 43-52. (1991).

- 64 - R.J. François. June 1988.
"Growth kinetics of hydroxide flocs.
Research and technology. 1988.
- 65 - STEVEN K. DENTEL & J.M. GOSSETTI (1988)
"Mechanisms of coagulation with aluminium salts."
JAWWA. 80: 187-198.
- 66 - G. UDAYA. BHAS. KAR. (1987)
"Syntheses and applications of anionic polyelectrolytes in water and
waste water treatment."
Water, air, and soil pollution 35: 251-260, 1987.
- 67 - STEVAN. K. DENTEL (1988).
"Application of the precipitation charge neutralisation model of
coagulation".
E.NVIRON SCI. Technol. Vol 22 N°7 (1988).
- 68 - A.M. SIMPSON, W. HALTON & M. BROCKBANK (1988).
"Aluminium, its use and control, in potable water."
Publications division selper L.E.D, 1988. Environmental technology
letters. Vol 9, pp 907-916, 1988.
- 69 - R.D. Litterman & CT DRISCOL (1988)
"Survey of residual aluminium in filtered water."
J.AWWA 80 (4): 154-158. APRIL 1988.
- 70 - Jean Yves BOTTERO, Jean Eric POIRIER and François FIESSINGER (1980)
"Study of partially neutralized aqueous aluminium chloride solutions:
identification of aluminium species and relation between the
composition of the solutions and their efficiency as a coagulant".
Prog. wat. tech Vol 12, Toronto pp 601-612, 1980.
- 71 - Charles T. Driscoll. & Raymond D. Letterman, Member, ASCE. 1988.
"Drinking water".
Journal of environmental Engineering. Vol 114. N°1. FEBRUARY, 1988.
- 72 - "The case against aluminium." *by Dr. Sivanam Krishnan*
Canadian research, March 1988.
- 73 - R.E. TURNER & KATHLEEN.E. MILES (1957).
"The ultraviolet absorption spectra of the ferric ion and its first
hydrolysis product in aqueous solutions".
Canadian journal of chemistry. Vol 35. 1957.
- 74 - "Wate Q, a computer program for calculating chemical equilibria of
natural waters."
Jour. Research U.S. Geol. Survey Vol 2, n°2. Mar-Apr. (1974). p 233- 248.
- 75 - "Characterisation of hydrolysed ferric iron solutions. A comparison of
the effects of various anions on the solutions.
Journal of colloid and interface science. Vol.52, n°2, August 1975.
- 76 - P.J. MURPHY - A.M. POSNER - J.P. QUIRK (1976)
"Characterisation of partially neutralized ferric chloride solutions".
J.C.I.S. Vol. 56. N°2. august 1976.

- 77 - THOMAS R. HUNDT - J.P. QUIRK(1988)
 "Aluminium fulvic acid interactions : machanisms and applications.
 J. AWWA . avril 1988.
- 78- W. J. WEBER JR - A.M. JODELLAH(1985)
 " Removing humic substances by chemical treatment and asorption".
 J. AWWA. april 1985.
- 79- Steven K. Dentel. James M. GOSSETT(1987)
 " Coagulation of organic suspension with aluminium salts".
 J. W.P.C.F. Vol. 59. N°2. february 1987.
- 80 _ MARTIS R. JEKEL. 1986.
 "Interactions of humic acids and aluminium salts with flocculation
 process".
 N°12 pp 1535-1542. 1986.
- 81 _ B. A. DEMPSEY - TANZEER A(1985)
 "Polyaluminium chloride and Alum coagulation of clay - fulvic acid
 suspensions".
 J. AWWA; march 1985.
- 82- O. BENABDALLAH, (1979-1980).
 "Clarification des eaux par l'utilisation des polychlorures basiques
 d'aluminium à la station de Médéa".
 Thèse pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome. 1979 _ 1980.
- 83 _ R. BOUDJENADI. (1991).
 "Conception de l'unité de prétraitement des eaux de refroidissement de la
 raffinerie d'Alger".
 Projet de fin d'études. 1991
- 84- A. KETTAB (1977)
 "Etude technico-économique du sulfate d'aluminium et des sels ferriques à
 la station de Annaba."
 Thèse d'ingénieur INA 1977.
- 85- J. Y. BOTTERO. (1979).
 "Etude de l'hydrolyse des solutions aqueuses de chlorure d'Al
 Conséquence sur la stabilité des colloïdes en vue du traitement des eaux
 de distribution".
 Thèse, présentée à l'institut national polytechnique de lorraine pour
 l'obtention du grade de Docteur ès-Sciences. Mai, 1979.
- 86 - S. JANROVIC. (1974).
 Manuel de chimie de l'environnement.
 OMS . Genève 1974.
- 87 - F. FIESSINGER.- J.M. BERSILLON. - J.Y. BOTTERO. (1977).
 " utilisation des polymères d'hydroxyde d'Al pour la coagulation des eaux".
 compte rendu de fin d'étude d'une recherche financée par la délégation
 générale à la recherche scientifique et technique. Avril, 1977.
- 88 - " Coagulation - Flocculation. Détermination des taux de coagulant"
 Société Lyonnaise des eaux et de l'éclairage. fév. 1978.

89 - " Simplified procedures of water examination. Laboratory manual.
AWWA. N° M12. 1975.

90 - " Directives de qualité pour l'eau de boisson".
Vol.3:"Contrôle de la qualité de l'eau de boisson destinée à
l'approvisionnement des petites collectivités".
OMS. Genève 1986.