

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

6/80

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

REX



PROJET DE FIN D'ETUDES

Sujet :

Epuration physico-chimique de
l'effluent aqueux de la raffinerie
d'Alger

Proposé par : M^{me} G. NEZZAL Etudié par : M^{lle} L. KARROUBI

Promotion : JUIN 1980

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE

EPURATION PHYSICO - CHIMIQUE DE L'EFFLUENT
DE LA RAFFINERIE D'ALGER



Etude de :

M^{elle} KARROUBI Leila

Dirigé par :

M^{eme} M E Z Z A L

PROMOTION JUIN 1980

A Mon Père
A Ma Mère
A Mes Soeurs et Frères
A Toute la Famille

A L'AMITIE

MEMBRES DU JURY

President : Mr ABROUK
professeur à l' U.S.T.B

Examineurs :

Messieurs :

SCHULMANN
expert de l'O.M.S

KELLIL
maître assistant à l' E.E.T.A

OBRETENOV
professeur à l' E.N.P.A

Invite : Mr AMROUCHE
directeur de la raffinerie de petrole
d'ALGER

AVANT-PROPOS

C'est un grand plaisir pour moi de pouvoir exprimer mes remerciements et toute ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidée de pres ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, du projet de fin d'études .

Ces remerciements vont tout particulièrement à :

Mr ABROUK, professeur, Recteur de l'université de Batna. D'avoir accepté, malgré la grande distance qui nous sépare, ^{de} présider ce Jury.

M^{me} NEZZAL, chargée de cours à l'E.N.P.A, d'avoir accepté d'être promoteur de ce travail, pour sa collaboration et sa gentillesse .

MM SCHULMANN, Expert de l' O.M.S, / Projet PNUD/OMS ALGO24/75

ET KELLIL, maître assistant à l'E.N.P.A, d'avoir manifesté un réel intérêt pour ce travail, ainsi que pour leurs précieux conseils .

Mr CBRETENOV, professeur, d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Mr AMBROUCHE, Directeur de la Raffinerie d'Alger, SONATRACH, pour la facilité de travail qu'il m'accordees et aussi d'avoir bien voulu honorer de sa présence ce jury de these .

Mr KETTAB, responsable du laboratoire de Traitement des Eaux, à l' I.N.A, pour l'intérêt certain et amical qu'il a apporté à cette étude.

Je tiens à remercier également tous les enseignants et personnels du département du Genie Chimique, pour l'aide sympathique et efficace qu'ils m'ont apportée, et plus particulièrement Mr ELABBES, Melle ALIA et Mr CHETTOUR pour le soutien moral qu'ils m'ont apportée.

Mes remerciements vont également aux personnels de la SONTRACH, sans oublier MM ZAITER, HALMAL, pour l'aide moral et sympathique qu'ils ont su me témoigner .

Je ne saurais oublier MM KHATTIB, menuisier à l' E.N.P.A, et ADEL plombier à l'E.N.P.A, OURARI responsable à la bibliothèque de l' E.N.P.A de m' avoir aidée dans la réalisation matérielle de ce travail .

Je tiens également à associer à ces remerciements les personnes qui m'ont aidée dans la réalisation matérielle de cette ouvrage:
M^{lle} M E R O U A N E et M. BERRICHI pour la frappe et M. CHERFAOUI pour le Tirage.

- S O M M A I R E -

I) - Introduction : Situation du problème

II) - Orientation de l'étude

- II.1 Effet de la pollution par les hydrocarbures
- II.2 Normes de rejet
- II.3 Origine des eaux résiduaires
- II.4 Conclusion

III) - But de l'étude

IV) - Les procédés de séparation liquide - Solide dans l'épuration des eaux

usées

IV.1 - Introduction

IV.2 - Traitement physico-chimiques

IV 2-1 Principe de base de la floculation

- (1) - Mécanismes responsables de la stabilité colloïdale et de la coagulation
- (2) Importance du potentiel Zeta
- (3) Conséquence du potentiel Zeta
- (4) - Classification des flocculants
- (5) - Amélioration des conditions d'utilisation des coagulants
- (6) - Amélioration de l'adsorption
- (7) - Caractéristiques du choix du flocculant

IV - 2 - 2. Mise du point d'un système pour le contrôle en continu

des procédés de floculation - decantation des eaux.

- (1) - Conception d'un flocc test
- (2) - Caractéristiques de floccs
- (3) - Hydrodynamique du système

a - Écoulement dans un tube courbé et calcul de la perte de charge.

b - Gradient de vitesse (G) du système hélicoïdal

c - Valeurs expérimentales de la perte de charge H dans une conduite

hélicoïdale.

IV - 2-3 Decantation

- Definition

A - Theorie de la decantation en continu

- a - decantation ideale
- b - decantation genée
- c - decantation par couche des particules

B - Decantation acceleree

- decanteurs lamellaires tubulaires
- decanteurs lamellaires - tubulaires inclinés
- Etude de la decantation dans un tube incliné
 - * equation de la trajectoire

C - Decantation classiques

- decanteurs statiques sans raclage
- decanteurs statiques avec raclage mécanique

V Montage Experimental

- V. 1 - Description du montage experimental
- V. 2 - Fonctionnement du pilote
- V. 3 - Caracteristiques hydrauliques du flocculateur.
- V. 4 - " " du decanteur

VI Etudes Experimentales

- VI -1 Methodes d'analyses pour le dosage des agents polluants.
- VI -1-1- Determination de la D. CO
- VI -1-2- Dosage de l'Azote total
- VI-1-3- Determination des phenols
- VI -1-4- " des Hydrocarbures

VI - 2 - Determination de la dose optimale en Fe_{cl3}

VI - 2 - 1 - Protocole expérimental

VI - 2 - 2 - Resultats

VI - 2 - 3 - Interpretations

VI - 2 - 4 - Conclusion

VI - 3 - Influence du temps de floculation sur l'élimination des agents
polluants

VI - 3 - 1 - Protocole expérimental

VI - 3 - 2 - Resultats

VI - 3 - 3 - Interpretation

VI - 3 - 4 - Conclusion

VII Methode de Jar-test

VII-1- Protocole experimental

VII-2- Observations visuelles

VII-3- Etude de l'efficacite d'elimination des H.C par
Infra-rouge

VII-4- Resultats et calculs

VII-5- Interpretation

VII-6- Conclusion

VII-7- Etude microphotographique

Conclusion Generale

Annexe:

1)--- Notations principales

2)--- Bibliographie

3)--- Resultats analytiques

I i n t r o d u c t i o n

L'eau est indispensable à toute les formes de la vie animale et végétale ainsi qu'à la plupart des activités humaines. Elle est en même temps très sensible aux modifications du milieu résultant de ses activités, ce qui ne va pas sans poser des problèmes aigus et permanents.

Dans le monde d'aujourd'hui, la pollution est devenue un fait réel, l'accroissement rapide des besoins en eau en face des ressources limitées entraîne une pollution de plus en plus considérable des eaux qu'elles soient profondes ou de surface.

Le traitement physico-chimique dont l'usage était exclusivement limité au traitement des eaux potables, fut depuis quelques années une entrée en force pour l'épuration des eaux résiduaires à dominante organique. Ce renouveau de faveur, après un abandon presque total au profit des processus biologiques, est certainement dû à la souplesse des procédés, à leur facilité d'adaptation à des débits et des charges très variables et à leur absence de sensibilité aux toxiques.

Un intérêt particulier a été porté aux techniques de floculation-décantation. Plusieurs travaux récents ont permis de préciser les plages de dosage de réactifs et ont apporté des éléments de comparaison tant sur le plan technique qu'économique entre les procédés biologiques et physico-chimique.

Dans la mesure où l'efficacité et le coût d'un procédé physico-chimique, et étroitement liés aux choix et au dosage des réactifs. Il faut reconnaître qu'en est souvent réduit dans ce domaine à une approche empirique et qu'aucune méthode satisfaisante ne permet à ce jour d'automatiser le fonctionnement d'une station physico-chimique en lui assignant un objectif tel que respect des normes de rejet, optimum économique.

Les méthodes de détermination rapides et continues des doses de réactif et encore peu répondues alors qu'un besoin, pour automatiser les chaînes de traitement, se fait de plus en plus sentir, de nombreuses études ont été faites sur ce sujet pour remplacer le contrôle visuel et discontinu (jar test) par des moyens plus scientifiques et automatiques. Sur ce, dans le cadre de notre étude, on se propose d'utiliser une méthode pour le contrôle en continu des procédés de floculation-des eaux. Ainsi les points suivants seront abordés.

determination de la dose et l'efficacité du coagulant-floculant correspondant à l'épuration maximum.

determination du temps de floculation optimum correspondant à la, dose de floculant optimum.

II.-o r i e n t a t i o n de l'etude:

C'est par plusieurs milliers de m³/h que se versent dans l'oued Adda, les eaux usées de la raffinerie. La pollution des eaux qui en résulte est donc considérable.

La pollution par les produits pétroliers et essentiellement une pollution par les hydrocarbures qui, en raison des propriétés toxiques de ceux-ci présentent particularité d'être d'autant plus nocive qu'elle est dispersée.

-1) effets de la pollution par les hydrocarbures:

-les dommages sont liés à la présence d'une couche d'huile, à la surface de l'eau de l'oued, plus ou moins épaisse, mais imperméable à l'air entraînant asphyxie de toute vie aquatique.

- risques d'inflammation.

- obstruction des branchies des poissons et enclavage des oiseaux.

- agglutination des algues et des planctons rendus inutilisables.

-salissure des rives, aspect et odeurs désagréables.

-les H.c à noyau benzenique sont cancérogènes.

-2) n o r m e s de rejet:

Les caractéristiques des eaux usées doivent satisfaire à un certain nombre de normes fixées, dans le cadre de l'exploitation d'une raffinerie. Dans la plupart des pays, on demande néanmoins de rejeter des eaux sensiblement neutres refl. caractérisées par:

-P.H doit être compris entre 5,5 et 8,5 ou 9,5

-la température doit être inférieure à 30°C.

-la teneur en matières en suspension doit être:

-a)- inférieure à 30mg/litre lorsque la raffinerie est proche d'une ville, d'une plage, etc... il arrive que dans certains cas particulier cette teneur soit abaissée à une valeur aussi faible que 10 p.p.m

-b)- inférieure à 50mg/l lorsque la raffinerie est isolée et lorsque la charge de pollution du milieu naturel est importante.

-c)- inferieure a 100mg/L lorsque la raffinerie est isolée et lorsque la charge de pollution du milieu naturel est faible.

Les normes de rejet particulieres,interessant les petroliers sont celles relatives à la D.C.O, à la D.B.O 5 aux hydrocarbures et aux phenoles.

-D.C.O ou demande chimique en oxygène (ref 17)

C'est la quantité d'oxygène en mg/l, consommée par une eau mesurée par reduction du bichromate de potassium en milieu acide et à l'ebullition sous reflux pendant deux heures.

Elle est relative a l'ensemble des matieres seductrices presentes dans une eau de nature minerale ou organique et susceptibles d'etre oxydées chimiquement.

Les correspondances stoechiometrique entre certains sels et la D.C.O est la suivante:

- sulfures:0,2g - O2/g
- phenols:2,3 g O2/g06 h5 oh z 7o 0,2 goo 2 z bh0
- thiocyanates (scn-) 2,2 O2/g
- cyanures: 2,9 g O2/g
- pyridine:3,0 g O2/g.

des precautions sont à prendre en manipulation pour éviter les interferences dues aux chlorures qui doivent être precipitées préalablement avant la mesure.

La legislation française impose dans le cas général un D-co moyenne de 90 mg/litre et maximale de 120 ml/litre, valeurs reduites à 50 et 80 ml/litre a proximite d'une prise d'eau potable.

-D.B.O5 ou demande biologique en oxygène en 5 jours (mg/L).

-c'est la quantité d'oxygène en mg/l consommée pour épurer biologiquement l'eau en cinq jours à 20°, avec ensemencement si necessaire à l'obscurité.

La mesure de D.B O5 sur les effluents d'une raffinerie de petrole est difficile pour trois raisons:

- la plupart des hydrocarbures ne sont pas normalement degradables sinon très lentement (en 25 à 30 jours).
- ils viennent s'absorber sur les boues bilogiques de l'ensemencement en bloquant l'activité de celles-ci.
- des composes toxiques- co-presentes avec les hydrocarbures peuvent inbiber le precessus bilogique.

on peut dire à la limite que s'il y a une D.B.O elle n'est pas mesurable.
par contre après des huilages poussés, la D.B.O peut être mesurée. Des valeurs faibles sont alors mesurées en l'absence de composés oxygénés ce qui est le cas des eaux pluviales des aires dallées mais non des eaux de process.

La correspondance effective entre certains composés organiques et la D.B O5 est la suivante:

- phenol: 1,8 g O2/g
- acrylonitrile: 0,7 g O2/g
- diethanalamine: 0,2 g O2/g
- glucose: 0,8 g O2/g
- alcool methylique: 0,85 g O2/g
- acide acetique: 0,62 g O2/g
- acide benzoique: 1,38 g O2/g

La demande biochimique en O2 ou D.B.O doit être

a)-inferieure à 40 mg/litre (raffinerie proche d'une ville, d'une plage).

b)-inferieure à 100 g/litre (raffinerie isolée avec charge de pollution importante).

c)-inferieure à 200 mg/litre (raffinerie isolée avec charge de pollution faible).

-la teneur en azote N₂ pour les cas précités: doit être:

- a) inferieur à 10 mg/litre.
- b) inferieure à 30 mg/litre.
- c) inferieure à 60 mg/litre.

La teneur en composés cycliques hydroxylés et leurs composés halogènes tels que les phénols et leurs dérivés doit être nulle.

II-3- origine des eaux résiduaires de raffinerie de pétrole:

Une raffinerie de pétrole comporte la combinaison complexe de processus de fabrication indépendants. Les principales opérations du point de vue de la lutte contre la pollution de l'eau sont ref (15).

-1) stockage de produits et de bruts.

durant le stockage des bruts, l'eau se sépare de l'huile et il en résulte une eau résiduaire. Contenant de l'huile libre et de l'huile émulsionnée, des matières en suspension et des boues de fond.

Le stockage des produits finis peut conduire à des eaux résiduelles alcalines chargées en d.b.o et plomb tetrathyle.

Le nettoyage de citernes peut fournir de grandes quantités d'huile de D.C.O et de matières en suspension.

-2) dessalage de bruts:

par voie chimique ou électrostatique cette opération est utilisée pour éliminer les sels minéraux, matières en suspension, l'arsenic et autres impuretés que peuvent empoisonner les catalyseurs du cracking catalytique. Les eaux résiduelles sont chargées en dbo et dco et renforment des huiles en suspension et aussi de fortes concentration en chlorures.

-3) fractionnement des bruts:

C'est le procédé principal pour séparer le brut en fractions intermédiaires de gammes de points d'ébullition différentes et comportant l'essence, le solvant naphta, le fuel oil et les goudrons asphaltiques. Les eaux résiduelles comportant l'eau soutirée des collecteurs supérieurs avant la recirculation ou l'extraction des hydrocarbures. Ces résidus sont chargés en huile, en chlorures, en mercaptans et en phénols. Les eaux résiduelles qui contiennent des émulsions proviennent des condenseurs barométriques.

-4) craquage thermique:

Il est utilisé pour séparer les fractions de points d'ébullition des huiles lourdes en faisant intervenir la chaleur et la pression. Les eaux résiduelles proviennent des collecteurs supérieurs ou fractionneurs. L'eau résiduelle contient des fractions d'huile, de l'ammoniaque, des phénols, elle est fortement alcaline.

-5) craquage catalytique:

Employé pour produire des essences de haute qualité et d'autres produits. L'eau résiduelle (eaux acides) provient des séparateurs de vapeur et des collecteurs de tête ou fractionneurs. L'eau résiduelle est alcaline et chargée en D.C.O. et en D.B.O. et contient de l'huile, des phénols et de l'ammoniaque.

-6) le traitement catalytique à l'hydrogène:

Employé pour convertir les fractions d'H.C en essence et distillats moyens de haute qualité, le procédé est basé sur le craquage catalytique en présence d'hydrogène. Les eaux résiduelles sont chargées en sulfures, phénols et ammoniaque.

-7) le "refining":

-6-

Employé pour convertir les naphthalenes en essence à haut indice d'octane et produire des aromatiques pour les essences d'aviation et la pétrochimie grâce à la déhydrocyclisation des paraffines le volume d'eaux résiduaires est faible.

- conclusion

L'élimination des micropolluants organiques au cours du traitement des eaux de surface revêt d'année en année une importance plus grande. Dans la mesure où ils peuvent agir sur l'organisme. Comme poison cumulatif et sont souvent à l'origine de goûts et d'odeurs qui affectent la qualité des eaux distribuées. Bien qu'ils représentent en général une part relativement faible de la charge organique totale, il est important de les éliminer au cours du traitement physico-chimique.

Le traiteur d'eau dispose pour lutter contre la micropollution chronique d'un arsenal relativement complet (charbon actif, ozonation ...) mais il paraît intéressant afin d'améliorer l'élimination de rechercher la dose optimale, de coagulants susceptibles de provoquer une bonne élimination au niveau du traitement physico-chimique (de coagulation, floculation) afin de pouvoir lutter plus efficacement contre une pollution éventuelle et de diminuer le coût de traitement.

III- But de l'étude:

La plupart des hydrocarbures ne sont pas normalement dégradables sinon très lentement (en 25 à 30 jours), par voie biologique, ceci est dû à l'effet stérique des grosses molécules à noyau benzénique. Il nous a semblé intéressant de tester un procédé physico-chimique d'épuration pour éliminer ces agents polluants. Dans ce but on a adopté un système contrôlé en continu de la floculation suivi d'une décantation à tube incliné.

On pense que cette élimination des h.c se fait par des phénomènes d'absorption sur la surface du floc chimique ou le gel d'hydroxyde vu leur surface spécifique qui est de l'ordre $180-220 \text{ m}^2/\text{g}$

Les avantages de cette méthode par rapport au procédé biologique classique sont:

- 1) simplicité du procédé physico-chimique.
- 2) le temps de séjour court (quelques dizaines de minutes).
- 3) adaptation à des variations de débits et de charge.
- 4) absence de sensibilité aux toxiques: Ex: plomb tétraéthylique, arsenic etc...).
- 5) possibilité d'automatisation.
- 6) compacité des unités de traitement.

IV- Les procedes de separation liquide-solide dans l'épuration des eaux usées.

IV-1 introduction:

D'une façon générale les produits polluants sont presents dans une eau residuaire sous trois formes:

- matières en suspension.
- matières colloïdales.
- matières en solution.

Pour l'essentiel, les procédés d'épuration des eaux residuaires ont pour rôle de transformer les matières colloïdales et les matières en solution en matières en suspension de façon à separer en une eau épurée et une boue en utilisant des opérations de separation liquide-solide.

Les opérations telles que décantation, filtration ont l'avantage de faire appel à un materiel relativement simple, et peu coûteux dont le fonctionnement n'exige qu'une faible consommation d'energie. L'ensemble de ces conditions explique l'importance et le developpement des operations de separation Liquide Solide dans l'épuration des eaux residuaires industrielles.

Cette importance se traduit notamment par la proportion élevée du coût d'investissement consacrée à ces ouvrages une bonne connaissance des bases theoriques des operations de separation Liquide solide permet un dimensionnement optimal des ouvrages et a donc une grande importance economique.

Presentation des chaines d'épuration d'eaux residuaires (biologique et physicochimique): localisation des differents procedés de separation liquide-solide (voir figure(1))

.A l'entrée d'une station d'épuration une eau usée subit un degriillage suit generalement une operation de dessablage dont l'objectif est de separer par sédimentation le sable et d'une manière generale les matières minerales facilement decantables:

Souvent est realiseé simultanément un deshuilage pour eliminer les graisses par flottation.

. Selon la nature du procede ulterieur d'épuration on aura alors a -procede biologique

C'est encore le procede le plus employé, il consiste en une decantation primaire, dont l'objectif est d'éliminer les matières en suspension.

Les matières colloïdales et dissoutes présentes dans l'eau sortant du decanteur vont servir de substrat à une population de microorganismes aérobie.

Dans le procédé d'épuration biologique le plus répandu cette culture continue de microorganismes dont la concentration peut atteindre quelques g/l est réalisée dans un bassin d'aération: c'est le procédé de boues activées. La croissance des microorganismes se fait sous forme de colonies visibles à l'œil nu; les floccs.

Ces floccs seront facilement séparés de l'eau dans un decanteur secondaire au mieux un clarificateur car son rôle est de fournir une eau clarifiée .

b- Procédé physico-chimique

L'addition de réactifs (électrolytes, macromolécules) détruit la stabilité de la suspension colloïdale et favorise le regroupement des particules sous forme de floccs; c'est le phénomène de floculation qui nécessite une agitation modérée pratiquée dans un flocculateur. Sur le flocc formé peuvent même s'adsorber des substances dissoutes.

La séparation du flocc de l'eau s'effectue comme précédemment dans un clarificateur.

Les deux opérations peuvent être réalisées simultanément dans un clariflocculateur.

L'eau ainsi épurée contient encore des matières en suspension et des matières dissoutes à des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de ppm . Si l'on souhaite une opération plus poussée, on peut faire appel à un procédé de séparation liquide-solide tel que filtration sur lit de sable ou microtamisage.

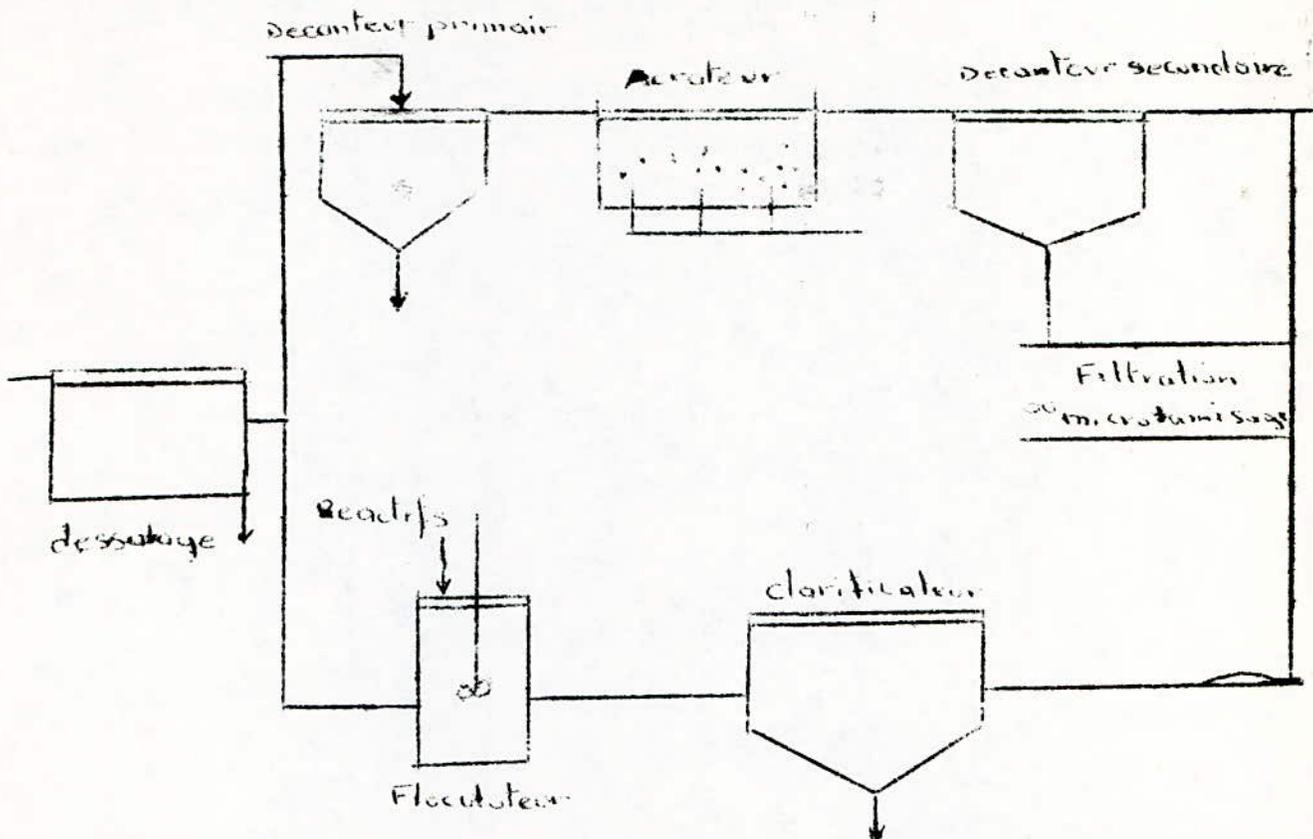


Figure 1 Schema general des procedes d'epuration des Eaux usées.

VI 2. Traitements physico-chimiques.

Ils exigent un effluent très peu chargé en matières en suspension:

IV-2-1 Principes de base de la floculation

La floculation est l'un des phénomènes le plus important dans les procédés du traitement des eaux.

On fait une distinction entre le phénomène de la floculation et la coagulation.

La MER (11) a précisé que la floculation et la coagulation étaient deux phénomènes différents et les a définies comme suit:

Le terme "coagulation" vient du latin "coagulare" signifiant conduire ensemble. Ce terme s'applique à l'action des sels neutres sur une dispersion colloïdale avec une réduction du potentiel répulsif de la double couche électrique entourant les particules et leur réunion en une forme compacte.

Le terme "floculation" vient du latin "floculare" qui signifie "former un flocon" c'est à dire une structure reticulée et poreuse.

Cependant la coagulation et la floculation de l'eau sont au sens techniques, des traitements physico-chimiques qui précèdent la phase de separation liquide solide. Ils ont pour effet de creer des agregats facilement separables.

La terminologie la plus courante associe la destabilisation à la Coagulation et le transport à la floculation

(1) Mecanismes responsables de la stabilité colloïdale et de la coagulation.

Le procédé de coagulation chimique et de floculation ont de nombreuses applications dans l'élimination des substances dissoutes. Les dernières années deux théories de base de la coagulation été avancées pour expliquer les mecanismes de la stabilité colloïdale et de la coagulation.

a- La théorie physique (21) prône le concept de la couche électrique et l'importance des facteurs physiques tels que l'adsorption conique, la réduction du potentiel zeta et la formation de paires d'ions, dans la destabilisation des colloïdes. Cette interpretation de la théorie physique a été poursuivie par une approche mathématique (basée sur le modèle de la double couche) des effets de la floculation.

b- La chimie de surface des colloïdes est une partie intégrante de la chimie.

Les systèmes colloïdaux sont caractérisés par une surface spécifique importante de la phase solide puisqu'elle est inversement proportionnelle au carré du diamètre des particules: une même quantité de matière, sous la forme de particules de 0,1 micron de diamètre développera une surface 100 fois plus grande que si elle était constituée par des particules de 1 micron (12).

On conçoit donc que les phénomènes superficiels jouent un rôle prépondérant dans la stabilité de ces dispersions.

On classe les colloïdes en deux catégories suivant leur comportement vis à vis du milieu aqueux.

La matière colloïdale la plus organique a une surface active représentée par des groupes hydroxyles ou carboxyles ($-OH$, $-COOH$, $-WH_2$). Ces groupes attirent les molécules d'eau (les molécules d'eau sont polaires) et forment une enveloppe à "lien-eau"; les colloïdes organiques sont hydrophiles. Ces colloïdes sont stables au sens du terme.

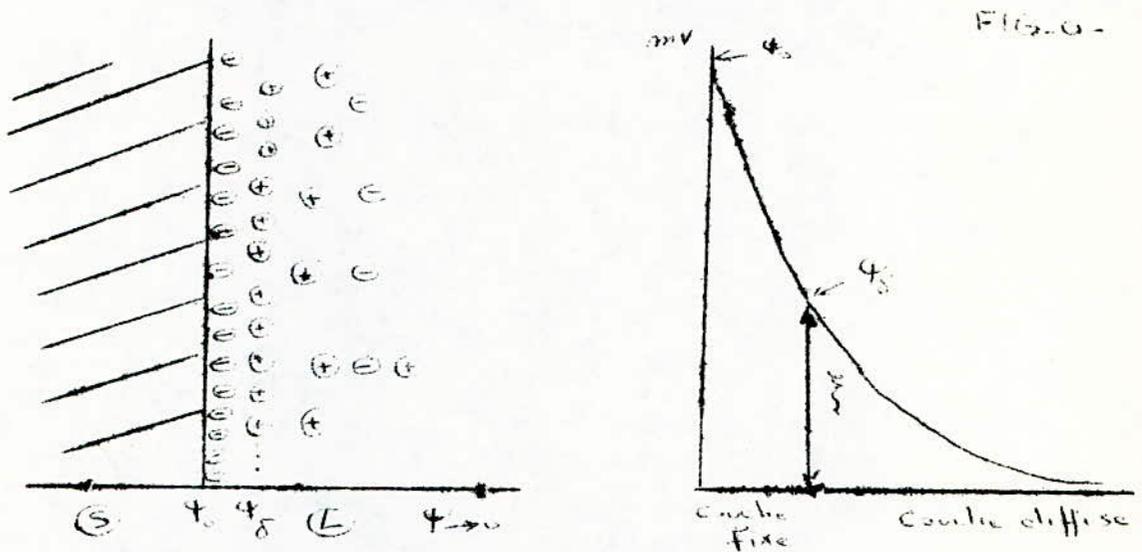
A l'inverse, les colloïdes inorganiques ne possèdent pas de groupe fonctionnel ne pouvant attirer les molécules d'eau polaires.

Leurs propriétés électriques sont contrôlées par une absorption conique préférentielle de la solution. Aussi, les colloïdes morganiques sont hydrophobes.

Leur stabilité est due à la charge électrique portée par les particules qui en gendre une repulsion prevenant toute agglomeration.

Généralement les colloïdes ont une charge négative. (zeta potentiel) dans les gammes de pH normaux.

D'une façon très simplifiée, la figure a- permet de mettre en évidence quelques caractéristiques de la particule colloïdales qui aideront à comprendre les mécanismes de la floculation(22)



Si on considère la limite entre une phase solide(S) et une phase liquide(L) aqueuse, on constate que la surface solide est couverte de charges électriques, généralement négatives, qui forment une pellicule continue. L'origine de ces charges varie suivant les cas considérés, mais leur présence est une règle quasi générale. Cette situation crée un déséquilibre électrique qui tend à être compensé par l'apport de charges positives provenant de la phase liquide. Ces charges se placent face aux charges négatives et dans la théorie initiale de Helmholtz on considèrerait l'équilibre ainsi rétabli. En fait l'agitation thermique perturbe la couche positive et la disperse en partie créant une couche diffuse où il règne une certaine prédominance de charges positives, excès qui va en diminuant lorsqu'on s'éloigne de la surface vers le cœur de la phase liquide où l'équilibre électrique est obtenu. Cette structure en couche négative de surface, couche fixe et couche diffuse a été élucidée par les travaux de Stern et de Gouy-chapman.

Si on le considère maintenant du seul point de vue électrique, en prenant ψ_0 comme potentiel au niveau du feuillet négatif, on démontre qu'il diminue de façon linéaire jusqu'à $\frac{a}{2}$ à la limite du feuillet fixe positif pour évoluer ensuite vers $\psi = 0$ au sein du liquide.

Le potentiel ψ_0 est encore appelé potentiel zeta et caractérisé en fait la couche diffuse.

(2) Importance du potentiel zeta.

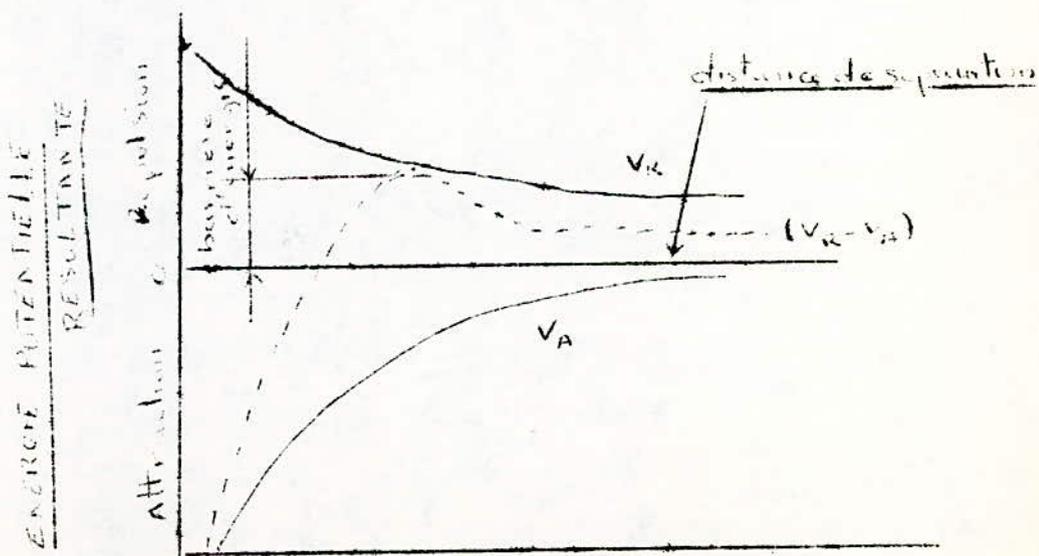
Par définition on appelle potentiel électro-cinetique ou potentiel ; le potentiel électrique en tout point du plan de cisaillement qui se trouve à l'intérieur de la double couche ionique. Il s'agit donc de la différence de potentiel entre la surface qui sépare la couche fixe et la couche diffuse et le sein du liquide.

Le potentiel mesure la charge électrique superficielle et détermine la grandeur des forces répulsives interparticulaires. C'est donc le potentiel zeta qui détermine la mobilité électrophoretique de la particule.

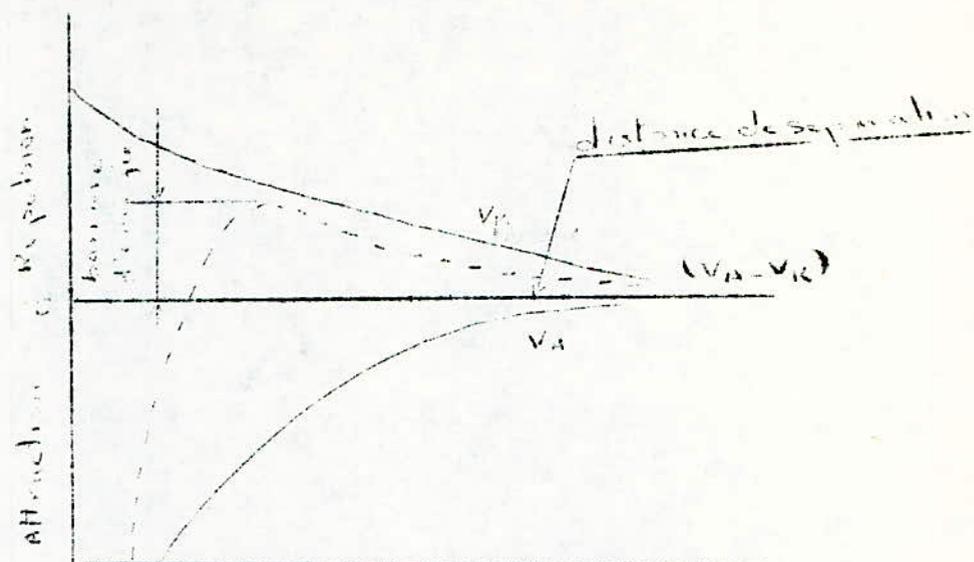
ce titre il est l'un des paramètres fondamentaux intervenant au cours de la floculation.

(3) Conséquences de l'existence du potentiel zeta.

Si l'on représente les forces qui se développent entre deux particules identiques, qu'on peut assimiler aux deux plaques d'un condensateur, il se développe (figure b) bien sûr, des forces de répulsion de nature électrostatique mais également des forces d'attraction du type Van der Waals, qui deviennent prépondérantes pour les très petites distances. La différence entre ces deux types de forces crée donc une sorte de "barrière de potentiel" qu'il faut franchir pour réaliser l'agrégation (22).



- Figure 13 -



-figb- Representation schematique des interactions se developpant entre deux particules selon leur distance de separation.

La coagulation consiste surtout en une compression de la double couche qui fait baisser la barriere de potentiel par addition d'electrolytes à l'eau de dosage optimum, et donc, en théorie, celui qui annule le potentiel zeta, mais, dans la pratique, on observe souvent qu'une bonne **distabilisation** peut être obtenue, même pour des charges residuelles appreciables, car d'autres phénomènes viennent, en fait, se superposer certains auteurs ont donc emis des doutes sur l'interêt pratiquer zeta. Il n'en demeure pas moins que le potentiel zeta nul reste une base de reference bien utile, pour apprecier d'état de coagulation des particules.

Conclusion.

On peut donc dire que les differents facteurs provoquent la stabilisation colloïdale sont de trois types.

- .Les forces electrostatiques de repulsion interparticulaires
- .L'hydratation de la surface des particules
- .L'action protectrice exercée par certains colloïdes organiques.

Cependant les facteurs qui contribuent à la distabilisation sont

- .Des forces d'attraction interparticulaires, telles que celles de London et Van der Waals.

- .Des facteurs mecaniques dont le mouvement Brow-nien provoquant l'élimination ou la reduction du facteur des stabilités préponderent.

On peut donc distinguer fondamentalement les procédés consistants à réduire les forces de repulsion électrostatiques responsables de la stabilité des colloïdes hydrophobes (coagulation) et ceux qui provoquent l'agglomération aussi bien des colloïdes hydrophiles qu'hydrophobes en agissant par adsorption.

(4) Classification des flocculants

La probabilité "d'adhésion" des particules après collision peut être augmentée par l'addition d'un ou plusieurs agents appelés FLOCCULANTS. Ils agissent en général suivant un ou plusieurs des trois mécanismes selon lesquels ils sont classés.

a) La première classe des flocculants, appelés électrolytes, agit par neutralisation de la force de régulation intermoléculaire (due à l'existence de la double couche). Ceci permet aux forces naturelles d'attraction, appelées forces de Van der Waals d'agir il en résulte une adhésion des particules.

b) La deuxième classe des flocculants, appelés coagulants, consiste en agents qui entraînent la précipitation, pour une gamme de pH déterminée, de volumineux flocons d'hydroxydes métalliques. Ces gros flocons retiennent "physiquement" les fines particules de la suspension

c) La troisième classe de flocculants, appelés polyélectrolytes, sont constitués par de longues chaînes de polymères à haute masse moléculaire, de provenance naturelle ou synthétique; ces polymères possèdent un grand nombre de sites actifs dont le long de leur chaîne, sur lesquels viennent s'accrocher les particules. Ces polymères constituent ainsi une liaison entre 2 ou plusieurs sites actifs de la même molécule de polymère. De plus, lorsqu'une particule unitaire est liée à plusieurs sites actifs polymère différents, les derniers sont liés entre eux. De nombreuses études ont été faites pour expliquer l'action de ces polyélectrolytes.

(5) Amélioration des conditions d'utilisation des coagulants

L'idée que l'on peut se faire, selon la théorie classique du mécanisme de la coagulation par un sel de fer (ou d'aluminium) comme par exemple, le chlorure ferrique ou le sulfate d'alumine, est représenté par le petit schéma voir (TS & M) (21) fig a .

L'ion ferrique (ou d'aluminium) ou ce qu'il est devenu, dès son introduction dans l'eau, doit parvenir au contact du colloïde.

Simultanément, il s'hydrolyse si bien qu'il réagit concurremment avec les ions OH et les colloïdes de l'eau. Finalement on obtient une particule distabilisée qui peut s'aggréger avec d'autres. Le gel d'hydroxyde ferrique (aluminium) qui le recouvre peut également servir de surface de fixation ou d'adsorption pour d'autres colloïdes qui n'ont pu venir en contact avec le fer plus tôt... Cela se produit au cours de la floculation est en accord avec l'observation couramment réalisée de la diminution de la teneur en matières organiques durant cette phase.

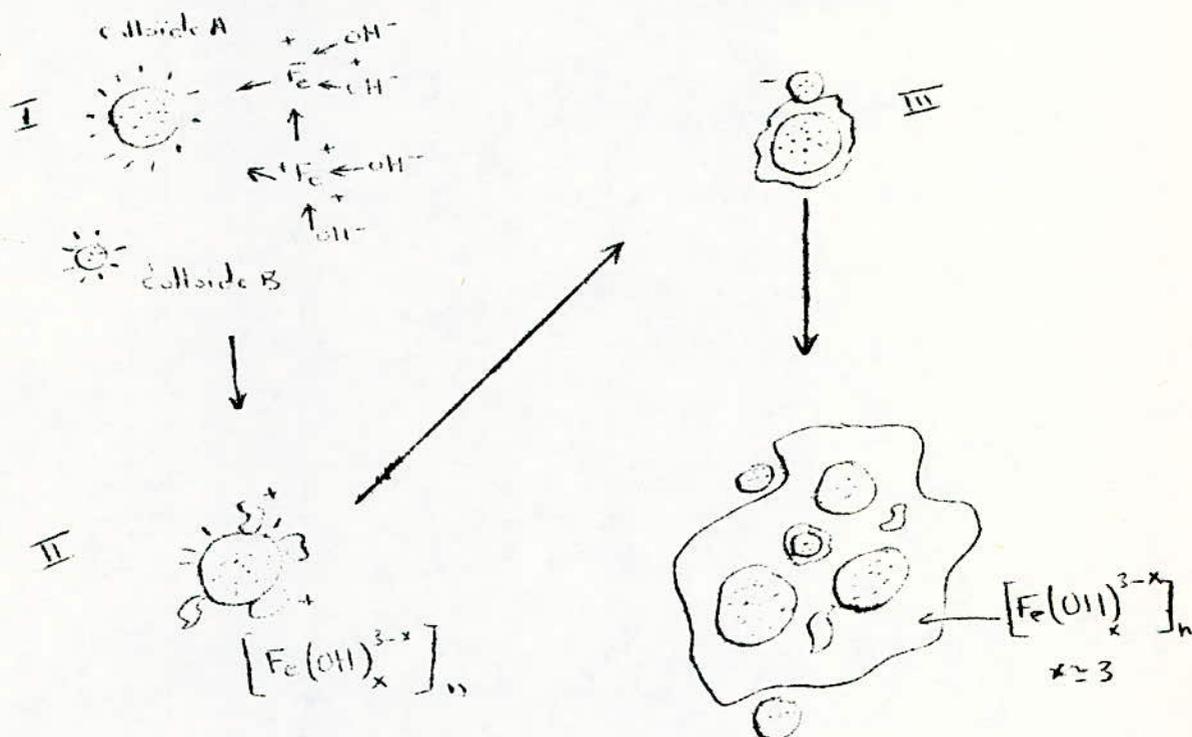


fig a schema classique du phénomène de coagulation

(6) Amélioration de l'adsorption

Autre phénomène qui intervient selon ce schéma, c'est le phénomène d'adsorption (21). S'il y'a adsorption sur le floc de polluant divers, il devait y'avoir un phénomène régi par une loi de type Freundlich. Plus la concentration en substance à éliminer est élevée, plus efficace est l'élimination (par unité de coagulant). A l'inverse, si l'on veut éliminer totalement le polluant, il faut un énorme excès de coagulant. La loi de Freundlich n'a bien entendu qu'un lointain rapport avec le reste de la coagulation.

On peut cependant en retrouver les effets.

En effet des études ont été entreprises, dans le mécanisme d'élimination de quatre micropolluants: le lindane, le benzopyrène, le diethyl phtalate et le di-nthyl phtalate par le coagulant minéral le chlorure ferrique. Les chercheurs(25) ont pu mettre en évidence dans chaque cas, le mécanisme interne de l'adsorption des micropolluants sur les gels d'hydroxyde d'aluminium et de fer.

Pour les deux premiers micropolluants les isothermes suivent une loi d'Henry pour les autres, l'adsorption est due à un changement de "phase du premier ordre dans la couche adsorbée sous l'influence des liaisons latérales.

La figure C. représente l'isothermes d'adsorption du benzopyrène et du lindane.

Les isothermes sont portées dans le plan: logarithme de la quantité adsorbée exprimée en milligramme d'hydroxyde formé en fonction du logarithme de la concentration à l'équilibre en(mg/l) de lindane ou benzopyrène.

Les isothermes présentent une allure linéaire caractéristique d'une première approximation d'une loi de type Freundlich de la forme.

$$\frac{x}{m} = k C_e^{1/n}$$

expression dans laquelle $\frac{x}{m}$ représente la quantité adsorbée et C_e la concentration d'équilibre, k et n étant des constantes caractéristiques du système étudié, le tableau suivant nous donne les valeurs calculées des constantes k et n .

nature de l'adsorption	k	n
Lindane	0,02	1,10
benzopyrène	1,21	1,41

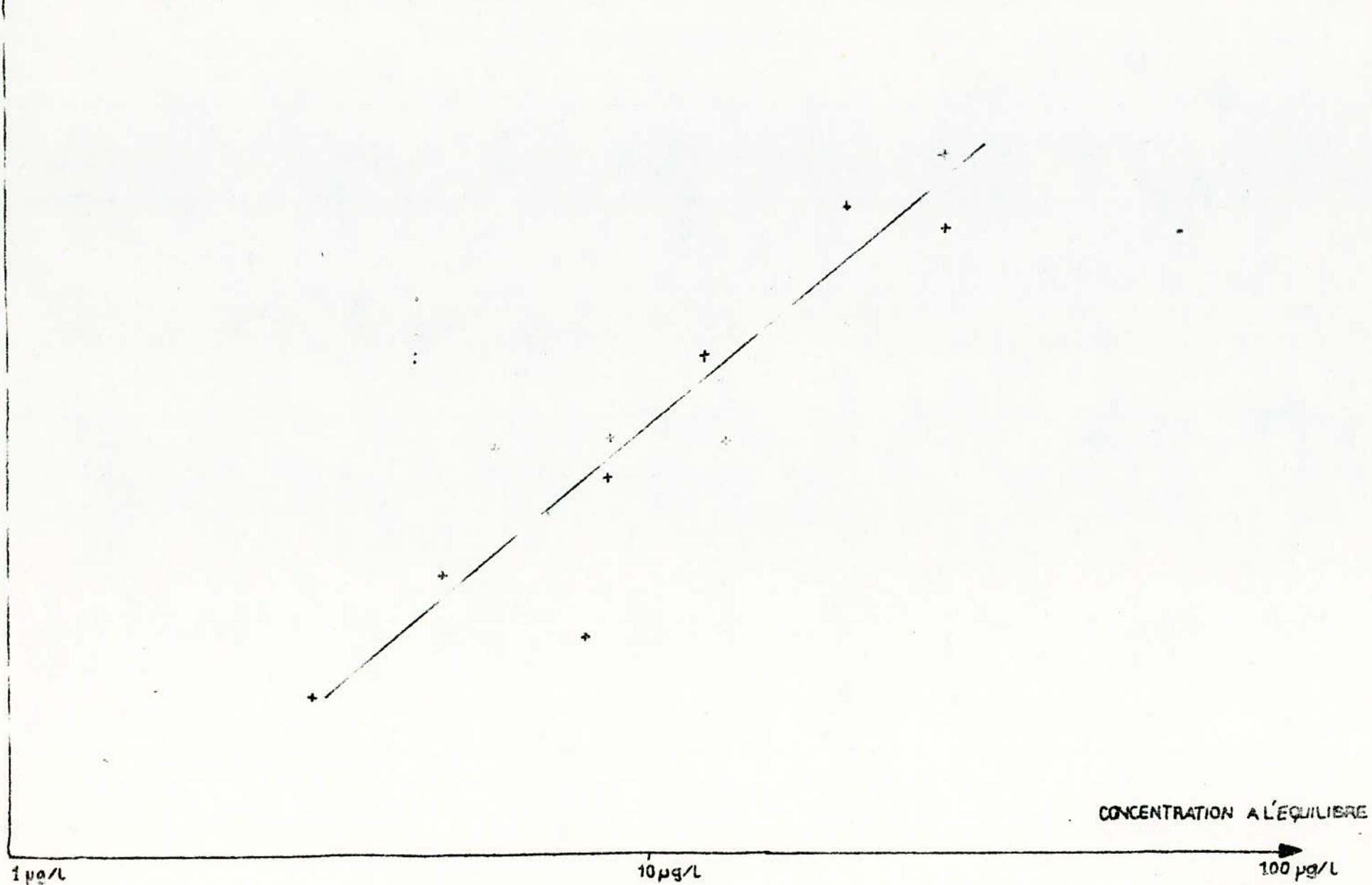
coagulant $F_e Cl_3$

D'après les résultats obtenus, il était possible d'écrire l'approximation

$$\frac{x}{m} = k.C$$

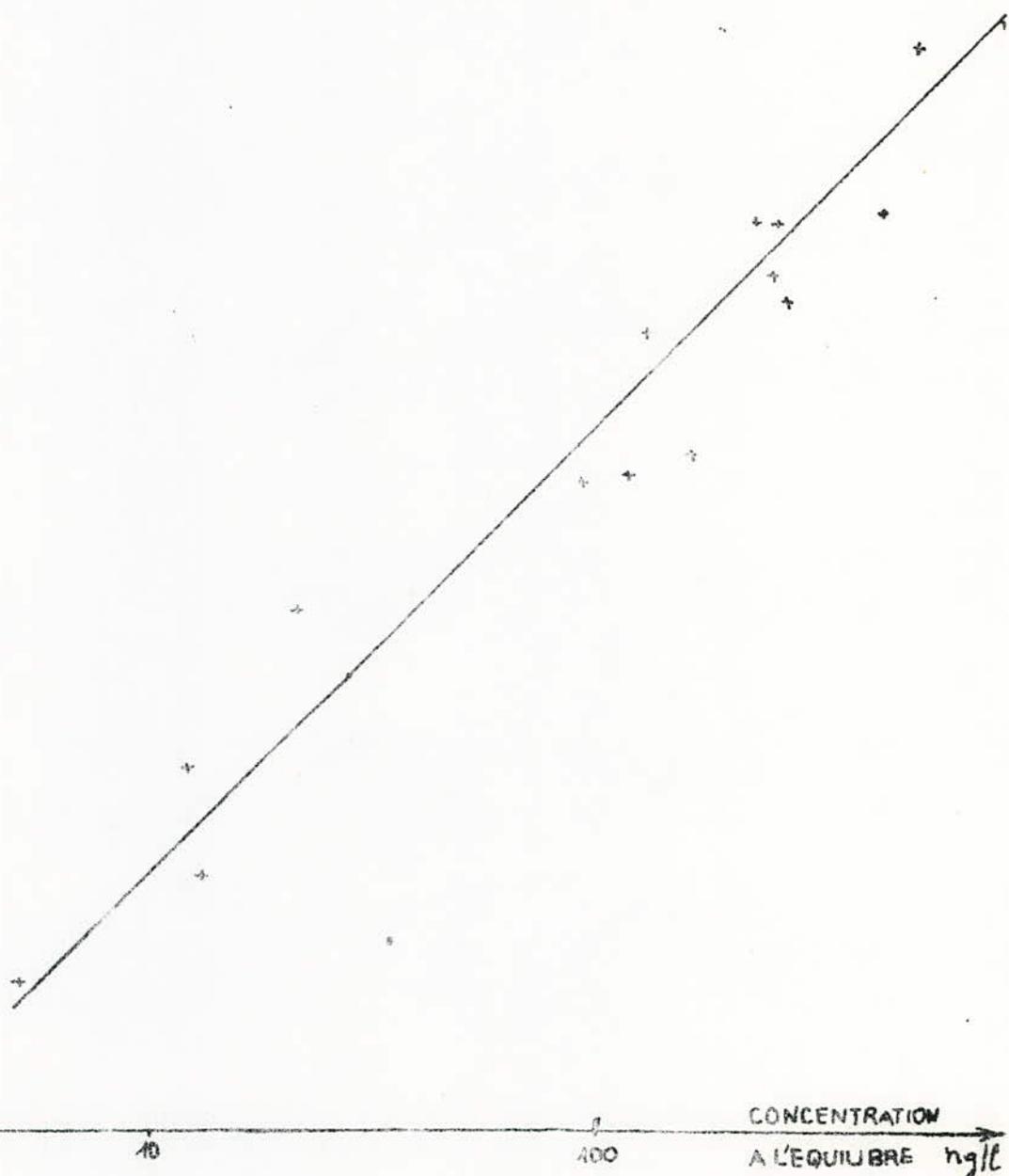
ISOTHERMES D'ADSORPTION DU BENZOPYRENE (isotherme d'Henry)

* ng/ng
▲ mg éliminé par mg
Fe(OH)₃



$\frac{m}{m} \times$
ng éliminés
par mg $Fe(OH)_3$

ISOTHERMES D'ADSORPTION DU LINDANE (isotherme d'Henry)



Physiquement, l'approximation revient à admettre que la surface est quasiment homogène du point de vue énergétique. On obtient alors une loi d'Henry, dont on sait (24) qu'elle représente l'expression de l'isotherme. Les γ aux valeurs très faibles du degré de recouvrement les conditions strictes d'application impliquent les contraintes suivantes.

- L'adsorption est localisée
- La surface est homogène du point de vue énergétique
- Les interactions latérales dans la couche adsorbée sont nulles
- Le degré de recouvrement de la surface par des molécules adsorbées est très faible la couche est extrêmement diluée.

En fait, les gels d'hydroxydes de fer²⁺ comportent comme des surfaces homogènes, la distribution énergétique des sites d'adsorption devant être très resserrées.

(7) Caractéristiques du choix du flocculant

Le choix du flocculant est déterminé par la nature de l'eau qu'on veut traiter, le résultat qu'on cherche à obtenir (élimination de substances organiques dissoutes, élimination de la turbidité ou de la couleur, ...) le mode de séparation qu'on utilise (décantation ou flottation, ...) et surtout par le coût qu'il représente.

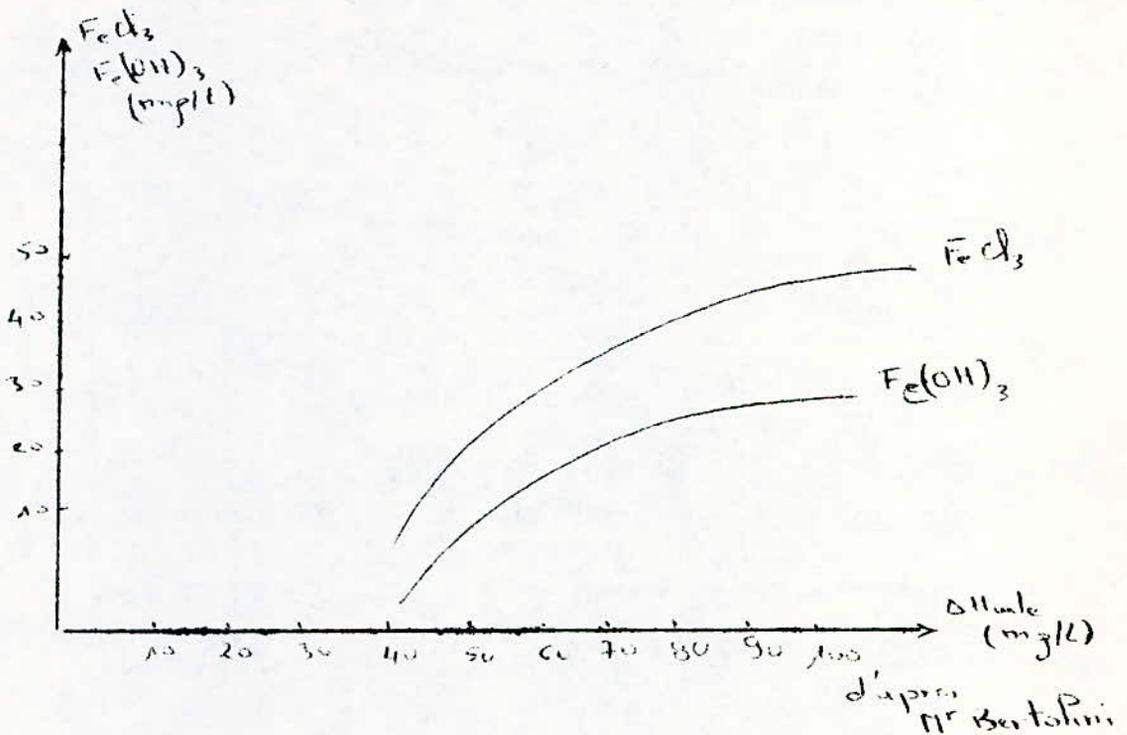
L'utilisation des agents flocculants a pour avantages

- réduction de la surface requise pour un appareil, ou capacité accrue pour un appareil existant.
 - Meilleure clarification des liquides recueillis à la surverse des décanteurs.
 - Notre choix pour le chlorure ferrique a été basé sur le fait que
 - Il possède une action spécifique de déshuilage meilleure que le sel d'aluminium (voir figure d) (17)
 - Le volume de boues produites est réduit
 - Lors de la coagulation-floculation il donne naissance à des flocons bien volumineux qui facilitent éventuellement la décantation.
 - Seul inconvénient, le $FeCl_3$ à un prix assez élevé
- Coût de quelques réactifs $FeCl_3$ 0,0028 (FF/m³)
 (25) $Al_2(SO_4)_3$ 0,0024 (FF/m³)

Au point de vue consommation de ces réactifs de coagulation, des études statiques ont montré:

- qu'une partie d'hydroxyde ferrique pouvait adsorber 3 à 0,6 parties d'huile voir ref (17) .

- que la dose d'hydroxyde pouvait être d'autant plus faible que le milieu était plus concentré, en huiles, ceci évidemment jusqu'à une limite au dessus de laquelle il y a risque de desorption.



- figd-henles adsorbées en fonction de la
de $FeCl_3$ ou $Fe(OH)_3$

Courbe indicative valable pour un melange particulier

$$x = \frac{(Huile) \text{ mg/l}}{Fe(OH)_3 \text{ mg/l}}$$

IV.2-2 Mise au point d'un système pour le contrôle en continu des procédés de floculation-Decantation des eaux.

La mise en place d'un système de contrôle en continu des procédés de coagulation-floculation-decantation peut amener une amélioration importante de fonctionnement.

On doit s'attendre également à une économie consécutive, à une réduction de la consommation de réactifs. Cette économie sera d'autant plus sensible que le coût spécifique des réactifs (ramené à l'unité de masse de DBO_5 éliminée) pour une épuration physico-chimique peut atteindre 5 à 10 fois le coût de l'énergie nécessaire à la fourniture d'oxygène dans une station biologique voir ref (13) .

D'autre part la qualité et le débit de l'eau à traiter sont variables et que ces deux paramètres sont totalement indépendants notamment dans le cas d'un réseau totalement ou partiellement unitaire.

Pour avoir en permanence un dosage optimal des réactifs il faut donc disposer, en plus de la mesure du débit, d'une mesure liée à la qualité de l'eau ou plus précisément, à son aptitude à la floculation.

(1) Conception d'un floc-test

Le dimensionnement de ce système utilise les critères conventionnels de la méthode standard du Jar Test en mettant à profit les études existantes sur différents types de flocculateur comme le flocculateur Cuette.

M^r Monsir (13) conçu un dispositif constitué par un flocculateur statique, appelé "FLOC-TEST", consistant en un tube disposé en hélice suivi d'un décanteur à tube incliné

(2) Caractéristiques de floccs

Au cours de la floculation de l'eau à l'aide de réactifs minéraux qui sont généralement le sulfate d'alumine ou le chlorure ferrugineux, les floccs formés ont une masse volumique relativement faible d'environ 1,002 g/cm³

Pour un flocc ayant un diamètre de 0,1 cm, par exemple la vitesse de chute est de l'ordre 8,3 · 10⁻² cm/s à la température ambiante

Toutefois, les gros floccs formés lors de la floculation peuvent atteindre un diamètre beaucoup plus important d'environ 0,3 cm voire d'avantage.

Pour éviter une possible sédimentation des floccs dans le flocculateur hélicoïdal, la vitesse d'écoulement du fluide doit être suffisamment importante: par analogie avec le phénomène de remise en suspension des dépôts de fond tel qu'il a été étudié dans les bassins de decantation. On peut supposer que cette contrainte se traduit par une valeur minimale du rapport $\frac{V_d}{V_c}$

Utilisant des résultats antérieurs on obtient voir ref (12)

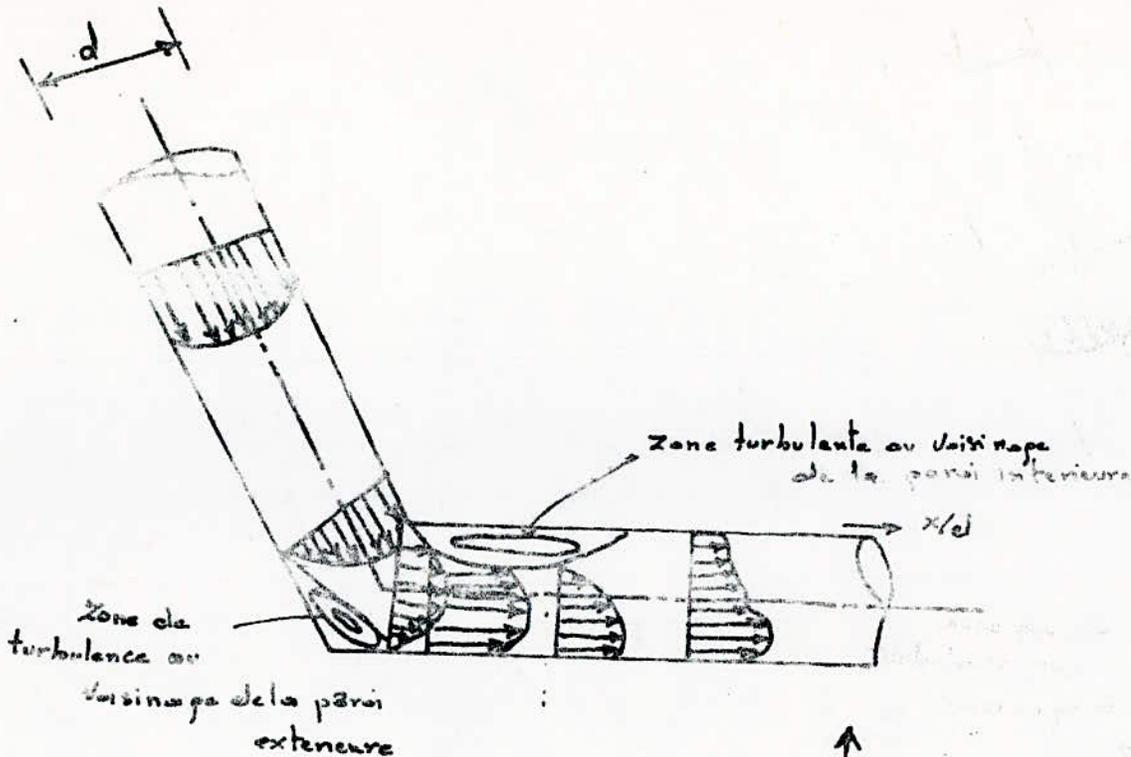
$$\frac{V_d}{V_c} = \left(\frac{8}{\lambda}\right)^{1/2}$$

avec V_d = vitesse de déplacement du liquide

V_c = " de chute de floccs

λ = facteur de frottement

Pour le compris entre 0,1 et 1, V_d/V_c est compris entre 3 et 9. Dans la pratique, ce rapport est généralement maintenu inférieur à 10.



↑
 Changement des profils des vitesses
 dans le coude et dans la section rectiligne
 qui le suit.

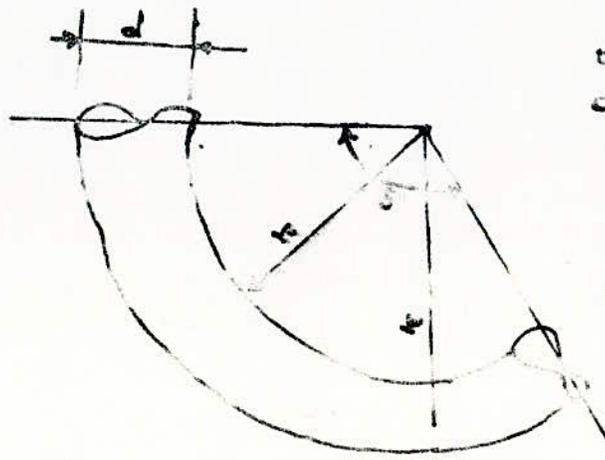


Schéma d'un coude

REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'ECOULEMENT
DANS UN COUDE

REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'ECOULEMENT
 DANS UN COUDE

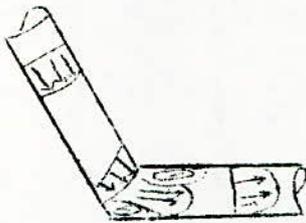
D'après ces résultats on déduit que pour une vitesse de chute de flocons d'environ $8,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$ la vitesse d'écoulement dans un flocculateur tubulaire doit être supérieure à 1 cm/s environ pour éviter la formation de dépôts dans le tube. La présence éventuelle de flocons de plus grande dimension incite à adopter une vitesse de passage plus importante.

(3) Hydrodynamique du système

a- Écoulement dans un tube coudé et calcul de la perte de charge.

Si l'on considère un tube coudé (fig 1). Dans les conduites courbes par suite du changement de direction de l'écoulement il apparaît des forces centrifuges dirigées du centre de courbure vers la paroi extérieure de la conduite.

La vitesse de coulement devient beaucoup plus faible vers la paroi intérieure et plus élevée vers la paroi extérieure.



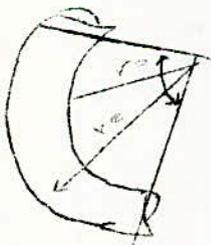
zone de turbulence au voisinage de la paroi intérieure.

- profil des vitesses
- profil des pressions

zone de turbulence au voisinage de la paroi extérieure

fig(1)

changement des profils des vitesses et de la pression dans le coude et dans la section rectiligne qui le suit.



schema d'1 coude.

Représentation schématique d'écoulement dans un coude.

λ = facteur de frottement défini par

$$\lambda = \frac{\Delta H}{v^2} \cdot \frac{d}{L}$$

Vu autre possibilité consiste à appliquer l'équation de POISEUILLE

$$\Delta H = \frac{32 \mu v L}{f g d^3}$$

En remplaçant la longueur réelle de la conduite (L) par une longueur équivalente (Le) qui tient compte de sa forme coudée, on obtient

$$K = \frac{64 \mu}{v d} \frac{L_e}{L}$$

on a une courbe donnant $\frac{L_e}{L} = f (Re (\frac{d}{d_0})^{1/2})$

b- Gradient de vitesse (G) d'un système hélicoïdal

L'équation de CAMP s'écrit

$$G = \left(\frac{P}{v \mu} \right)^{1/2}$$

Dans le cas d'un flocculateur statique continu la puissance dissipée dans le système est proportionnelle à la perte de charge.

$$P = Q \cdot f \cdot g \cdot \Delta H$$

soit $G = (g/v) (Q/v \Delta H)^{1/2}$

Dans le cas d'un flocculateur hélicoïdale l'expression de G est déterminée de la façon suivante:

$$G = \left(\frac{P}{v \mu} \right)^{1/2} = \left(\frac{Q f g \Delta H}{A L \mu} \right)^{1/2} = \left(\frac{32 \mu v^2 L_e}{L \mu d^2} \right)^{1/2}$$

$$G = 5,66 \frac{v}{d} \left(\frac{L_e}{L} \right)^{1/2} \quad \frac{L_e}{L} = f \left(Re; \left(\frac{d}{d_0} \right)^{1/2} \right)$$

L'apparition d'une force centrifuge et la présence d'une couche limite au voisinage des parois expliquent la naissance d'un écoulement secondaire (transversal) dans la partie coudée. Un mouvement de rotation se superpose à l'écoulement principal parallèlement à l'axe de la conduite et donne aux lignes de courant une forme hélicoïdale.

L'origine principale des pertes de charges est donc la formation de tourbillons surtout en voisinage de la paroi intérieure

La nature de l'écoulement et la valeur du coefficient de perte de charge des conduites courbes dépendent à la fois des facteurs qui déterminent le degré de turbulence de l'écoulement.

-nb de Reynolds $Re = \frac{v d}{\nu}$

-rugosité relative des parois

-de la forme de la conduite

angle au centre - δ°

rayon de courbure $\frac{v d}{r_e}$
ou $\frac{v d}{r_e}$

Le coefficient et perte de charge global des coudes est évalué comme la somme des coefficients de perte de charge singulière du coude (ξ_m) et perte de charge par frottement (ξ_f)

$$\xi = \frac{H}{V^2/2g} = \xi_m + \xi_f \quad \text{où } H = \text{perte de charge}$$

$V =$ vitesse d'écoulement

$g =$ accélération due à la gravité

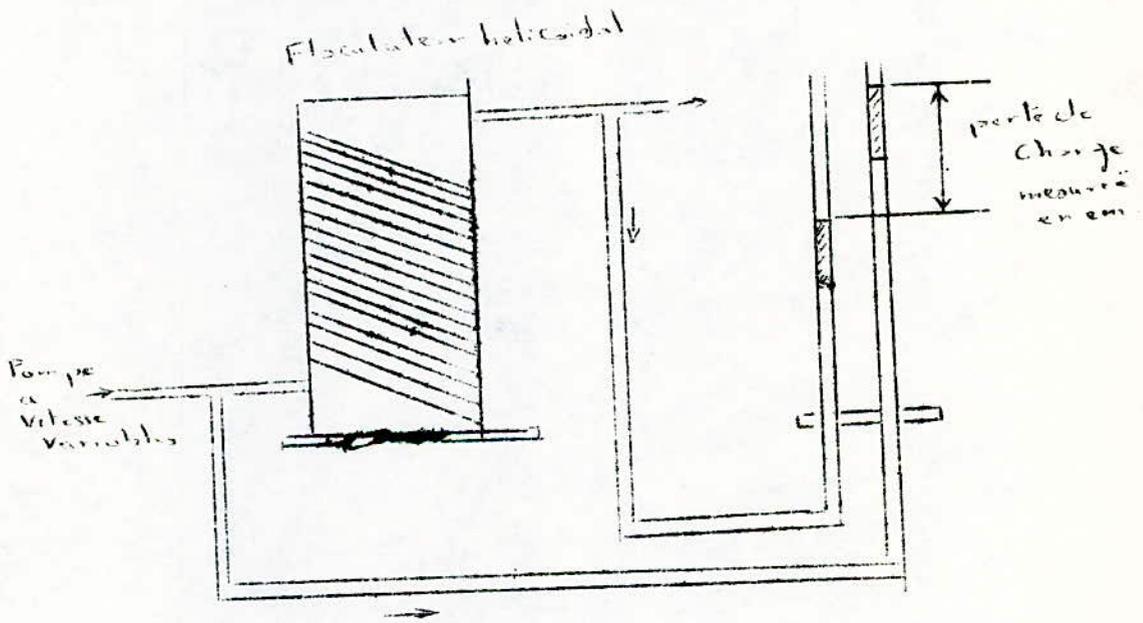
Les coefficients de perte de charge singulière (ξ_m) des coudes sont indépendantes du nb de Reynolds seulement pour $R > 2.105$.

Pour les valeurs de Re inférieures, il existe une relation complexe. Dans le cas des conduites à grande courbure (laquelle cas du flocculateur hélicoïdale) pour lesquelles $\frac{dc}{d} \gg 3$, on peut toutefois ne ~~le~~ compte que de terme de frottement.

$$\xi = \xi_f = \lambda \frac{L}{d} \quad \text{où } L = \text{longueur suivant l'axe de la conduite coudée}$$

$\lambda =$ facteur de frottement.

C- Valeurs expérimentales de H dans une conduite hélicoïdale



Montage expérimental de la mesure de la perte de charge dans un flocculateur hélicoïdal ($V = 2000 \text{ cm}^3$)

IV-2-3- Decantation

- Def: On appelle decantation, le déplacement d'une particule ou d'un ensemble de particules sous l'action de la pesanteur, constituant une phase heterogène, sous l'action d'un champ de force de la pesanteur les corps constituant la phase heterogène ayant une densité supérieure à celle de la phase homogène.

Les appareils dans lesquels on effectue ces operations s'appellent soit des clarificateurs, soit des epaisseurs suivant la fonction qu'on leur reserve, et souvent d'une maniere generale decanteurs.

Ils sont constitues par des cuves ou des bassins pouvant fonctionner en discontinu ou plus generalement en continu de la maniere suivante

La suspension à decanter est introduite en un point de la cuve aussi eloigné que possible de la partie où on recueille le liquide generalement appelé surverse la suspension epaissie est extraire du fond de la cuve: elle est appelée generalement sous verse.

A Theorie la decantation en continu.

a- decantation ideale ref (19)

1- decanteur à flux vertical.

Dans ce systeme, pour qu'une particule sedimente, il faut que la vitesse de chute soit superieure à la vitesse d'entrainement du fluide c'est a dire : $|\vec{V}_s| > |\vec{V}|$

son efficacite d'elimination des particules

$$E_p = 1 - P(V_{sc}).$$

où $P(V_{sc})$ est la fraction des particules dont la vitesse limite de sedimentation est inferieure à V_{sc} vitesse critique de sedimentation

2- Decanteur à flux horizontal.

La premiere etude theorique de la decantation en continu fut l'oeuvre de Camp (7) qui, à partir des hypotheses suivantes.

- la suspension des particules discretes
- la vitesse de sedimentation d'une particule est supposee constante.

- la concentration en particule de chaque dimension est identique en tout point de la zone de decantation

- l'elimination de la particule est effective quand celle-ci atteint le fond du decanteur.

demontre que l'efficacite d'elimination d'un tel systeme s'ecrit sous la forme.

$$(1) \quad E = 1 - PV_5(h) + \frac{1}{V_5(h)} \int_0^{PV_5(h)} V_5(y) dP_V(y).$$

0°) P V₅(h): fraction des particules dont la vitesse limite de sedimentation est inferieure à V₅(h)

h : hauteur du decanteur

V₅(h): vitesse critique de sedimentation particules presentes dans la couche superficielle à l'entrée du decanteur

y : ordonnée à laquelle entre les particules dans le decanteur.

Comme le montre la formule(1) dans un decanteur à flux horizontal, seront retenues toutes les particules dont la vitesse de sedimentation est superieure à V₅(h) mais de plus est retenue une fraction de particules de dimensions inferieures parcequ'elles arrivent dans la section d'entrée à une hauteur inferieure à h.

(b)- Decantation genée (hinderid settling)

D'après la RIAN (9) une decantation devient nettement genée à partir du moment où la distance entre les particules descend au dessous de 10 fois leur diametre.

Dans ce cas on ne peut plus dire que les particules se deplacent dans un fluide pur:dans certains cas,les phenomenes sont representés, en considerant que les particules se deplacent dans un melange homogene fluide+particules.A ce nouveau fluide correspondent une viscosité et une masse volumique fonctions de la concentration.

Des formules ont pu être etablies tellesque.

$$V_0 = V_1 (f (\xi))$$

avec V₀= vitesse limite des particules dans la suspension

V₁= vitesse limite d'une seule particule dans le fluide

$$\xi = \text{degré de vide} = 1 - \frac{\text{volume de particules solides}}{\text{volume de la suspension}}$$

En pratique, pour des suspensions relativement on aura bien souvent interêt à recouvrir à l'experimentation, etant donné que d'autre facteurs, comme les forces electrostatiques, la tendance à l'agglomeration la compression plus ou moins importante de la couche de sediments, peuvent intervenir.

Quand l'ecart à la decantation ideale est dû aux interactions entre particules, les equations de base peuvent être corrigées.

En effet on suppose que le mouvement de chaque particule est celui d'une sphere isolée une sein de fluide à la suspension. Le fluide equivalent est caracterisé par

$$\rho_A = \rho_S + (1 - f) \rho_L$$

- une viscosité $\mu_A = \mu_L \exp \frac{K\beta}{1-q\beta}$

avec β = fraction de volume occupé par les particules

ρ_s, ρ_L = densités respectives des particules et du liquide

μ_L = viscosité du fluide

K, q = constantes empiriques

On peut calculer la vitesse de sédimentation d'un ensemble de particules identiques.

En régime laminaire et après le report des expressions A et A dans l'équation exprimant la vitesse de sédimentation d'une particule sphérique isolée au sein du fluide.

$$V_5 = \frac{4}{3} \frac{d^{1+n}}{\mu_L^n} \times g \times \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L^{1-n}}$$

où V_5 : vitesse de sédimentation

d : le diamètre de la particule

μ : viscosité dynamique

ρ_s : densité de la particule

ρ_L : densité du liquide

a et n : coefficients dépendant du régime d'écoulement.

La vitesse de chute V_i d'un ensemble de particules identiques s'écrit

$$V_i = V_5 (1 - \beta) \exp \frac{-K\beta}{1-q\beta}$$

(C) Decantation pour couches des particules

La decantation par couches est caractéristique des suspensions de boues activées et de floculation par voie chimique lorsque la concentration en matières solides dépasse environ 500mg/l. Les particules floculées adhèrent entre elles et la masse decante en piston en formant une interface distincte entre le floc et le liquide surnageant.

Le processus de decantation se distingue par trois zones

Zone (1): la concentration et la vitesse de sédimentation des particules sont constantes et égales aux valeurs initiales

$$C = C_0 ; \sqrt{V} / = \sqrt{V} /$$

Zone (2): la vitesse de chute et la concentration varient

- la concentration augmente

- la vitesse de chute du piston diminue

Zone (3): le floc est soumis à une compression, et la vitesse de chute continue à décroître.

La théorie de Kynch (fig) (15) donne en tout point M de la courbe de decantation les couples $(C_M; V_M)$

Concentration et vitesse de chute du piston

$$C_M = \frac{C_0 h_0}{h_M} \quad \text{et} \quad V_M = -\frac{dh}{dt}$$

où h_0 = hauteur initiale de la suspension

h_M = ordonnée à l'origine de la tangente à la courbe au point M

M_M = ordonnée du point M à l'instant t.

On le but recherché au cours d'une decantation est double: essentiellement la classification de l'effluent et si possible la concentration.

Le premier objectif est atteint à partir du moment où la charge superficielle $\frac{Q}{S} = \frac{\text{debit volumique}}{\text{aire de la section}}$ est inferieur à la vitesse de

chute de piston.

Si l'on desire accroître la concentration de la phase boueuse, il suffit de reduire la vitesse ascensionnelle en augmentant l'aire du decanteur.

B- DECANTATION ACCELEREE (high rate settling)

Dans les decanteurs classiques utilisés en traitement et epuration des eaux, le temps de sejour est relativement long: 1heure à 3heures environ. Ces installations se pretent donc mal à une regulation par l'aval (feedback) qui serait pourtant souhaitable dans le cas notamment d'epuration physico-chimique d'effluents industriels dont les caracteristiques peuvent varier fortement en fonction du temps.

Ceci explique l'interêt porté aux decanteurs accélérées qui permettent d'obtenir une efficacité identique avec un temps de sejour beaucoup plus faible (une dizaine de minutes environ).

decanteurs lamellaires- tubulaires

L'idée des decanteurs lamellaires remonte au debut du siècle; effectivement c'est en 1904 que HAZEN (5), dans une étude. On sedimentation lança l'idée de cette technique. Il y enonce une serie de proposition dont

" l'elimination des matières en suspension d'un effluent est fonction de la surface du decanteur, de la vitesse de sédimentation, du debit, et independante de la hauteur de chute".

L'auteur suggère l'introduction de plaques parallèles legerement espacées; un peu plus tard BOYCOTT (7), étudie la decantation statique en tubes inclinés, met en évidence la decantation statique en tubes inclinés, met en évidence.

L'intérêt du procédé et l'influence de certains paramètres. L'insertion de tubes ou de plaques en position horizontale ou très faiblement inclinée, bien qu'elle soit théoriquement la solution la plus satisfaisante, de heurte au problème technique d'accumulation.

-C'est pourquoi cette technologie est limitée au cas des effluents très peu chargés (eaux potables).

Par contre l'utilisation de plaques ou tubes à inclinaison plus forte est conseillée dans le cas où l'effluent est très chargé pour l'épuration des eaux résiduaires.

Lamellaires et tubulaires inclinés

Les travaux de HILSEN (22), de FORSELL (10) et de CHURCHILL ont mis en évidence l'intérêt de la technique des decanteurs lamellaires inclinés. Ce qui vient de confirmer récemment l'étude de VAN LIET (14) et KELLIL (7)

D'après les études faites, le gamme d'inclinaison optimale se situe entre 45° et 60° et selon des considérations pratiques amènent à choisir.

- . $\theta = 60^\circ$ pour permettre l'écoulement des boues dans le cas d'un système à contre courant.
- . $L = 1$ à 2 mètres pour limiter l'encombrement
- . $d = 50$ mm pour éviter les risques de bouchages.

ETUDE DE LA DECANTATION DANS UN TUBE INCLINE

a- équation de la trajectoire

Soit une particule de vitesse de sédimentation v_s entrant dans un tube incliné de rayon R au point de coordonnées $(0, y, z)$. Les composantes de la vitesse résultante à laquelle est soumise cette particule au cours de son déplacement dans le tube:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= u - v_s \sin \theta \\ \frac{dy}{dt} &= -v_s \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = 0$$

En régime laminaire le profil de vitesses est parabolique

$$U(y, z) = 2U \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2)$$

où

$$r^2 = y^2 + z^2$$

R = rayon du tube

U = vitesse moyenne d'écoulement du fluide.

d'où en tenant compte de (2) il vient:

$$\frac{dx}{dt} = 2U \left(1 - \frac{y^2 + z^2}{R^2}\right) - v_5 \sin \theta$$

$$\frac{dy}{dt} = -v_5 \cos \theta$$

$$\frac{dz}{dt} = 0$$

A. L'intérieur du tube incliné il existe deux zones:

1- une zone où la composante de v_r parallèle à l'axe des x est supérieure à la vitesse moyenne d'écoulement.

$$v_r \sin \theta > U$$

2- une zone où $v_r \sin \theta < U$

Le lieu géométrique qui sépare les deux zones est donné par

$$U = v_5 \sin \theta = 2U \left(1 - \frac{y^2}{R^2}\right) \quad r_0 = R \left(1 - \frac{v_5 \sin \theta}{2U}\right)^{1/2}$$

L'expression générale qui régit le mouvement de la particule à l'intérieur du tube incliné s'obtient par simple intégration en éliminant des deux expressions la variable temps.

$$\frac{dx}{dy} = \frac{2U \left(1 - \frac{y^2 + z^2}{R^2}\right) - v_5 \sin \theta}{-v_5 \cos \theta}$$

$$dx = -\frac{2U}{v_5 \cos \theta} \left[\left(1 - \frac{y^2 + z^2}{R^2}\right) - \frac{v_5 \sin \theta}{2U} \right] dy$$

$$x = \frac{2U}{3 R^2 v_5 \cos \theta} (y^2 + R^2 - z^2) - \frac{v_5 \sin \theta}{2U} y + K$$

K = constante d'intégration déterminée par les conditions initiales.

Si la particule pénètre dans le tube sur un cercle de rayon $\times R$ ($\times < 1$) tel que $R^2 \times^2 = y_1^2 + z_1^2$ d'où valeur de K.

$$K = \frac{2U}{3 R^2 v_5 \cos \theta} (R^2 \times^2 - z_1^2) - \frac{v_5 \sin \theta}{2U} y_1$$

C. Decanteurs Classiques ref (2)

- Decanteurs statiques sans raclage.

a' - decanteurs cylindro-coniques ordinaires:

Le decanteur, à flux vertical; généralement de forme cylindro-conique, l'angle du cône se situe entre 50-60° par rapport à l'horizontal, trouve sa place dans les installations de petite taille.

- Decanteur statique à flux horizontal

Ce système ne convient que lorsque le volume des boues à decanter est faible, car l'évacuation de ces dernières nécessite un vidange totale du bassin périodiquement.

D'autre part, cette solution exige de grandes surfaces et un génie-civil important.

- Decanteurs statiques avec raclage mécanique

Quand la charge polluante est élevée, l'utilisation d'un système de raclage mécanique est nécessaire.

Il existe de nombreux types de decanteurs raclés.

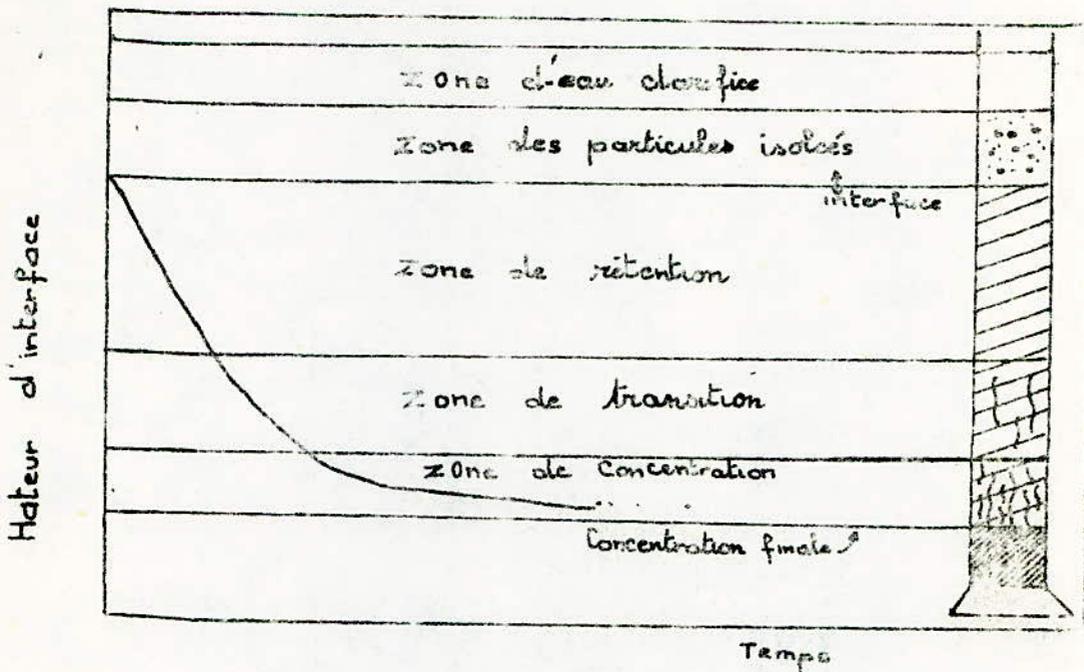
α - decanteur circulaires.

Dans les decanteurs circulaires, le racler est fixé à une charpente tournant autour de l'axe du bassin.

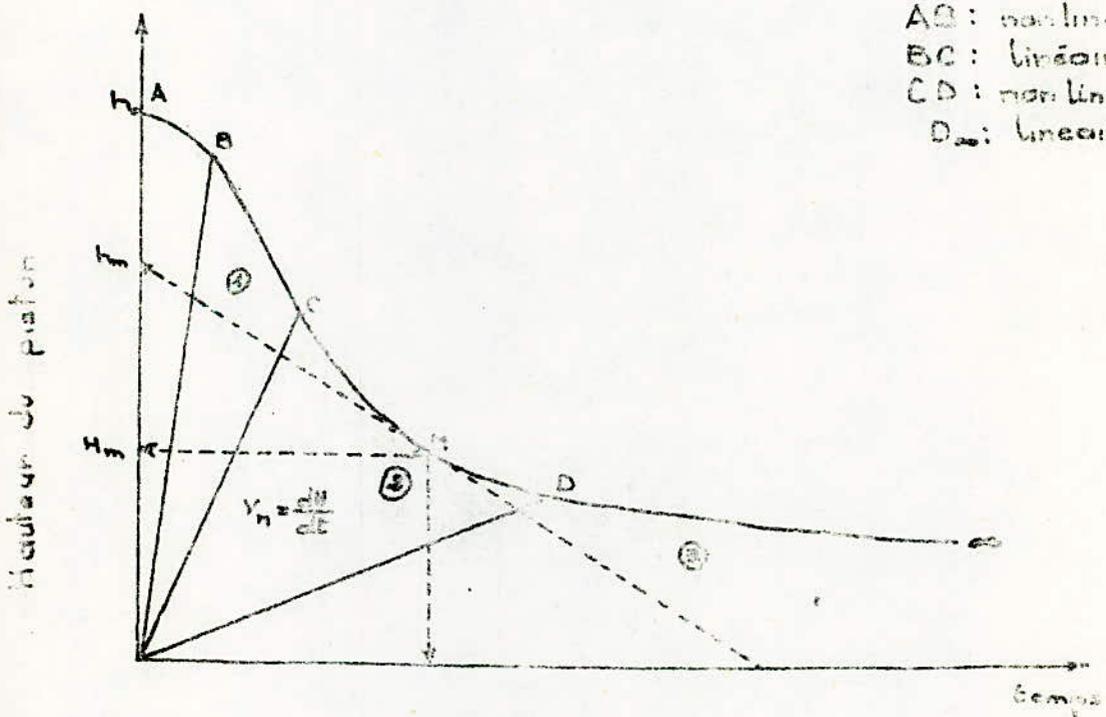
Suivant le traitement utilisé et la qualité de l'eau traitée il peut-être utile de prévoir un système d'écumage en surface. Ce système est particulièrement utilisé dans le cas des eaux résiduaires.

β- Les decanteurs Longitudinaux rectangulaires

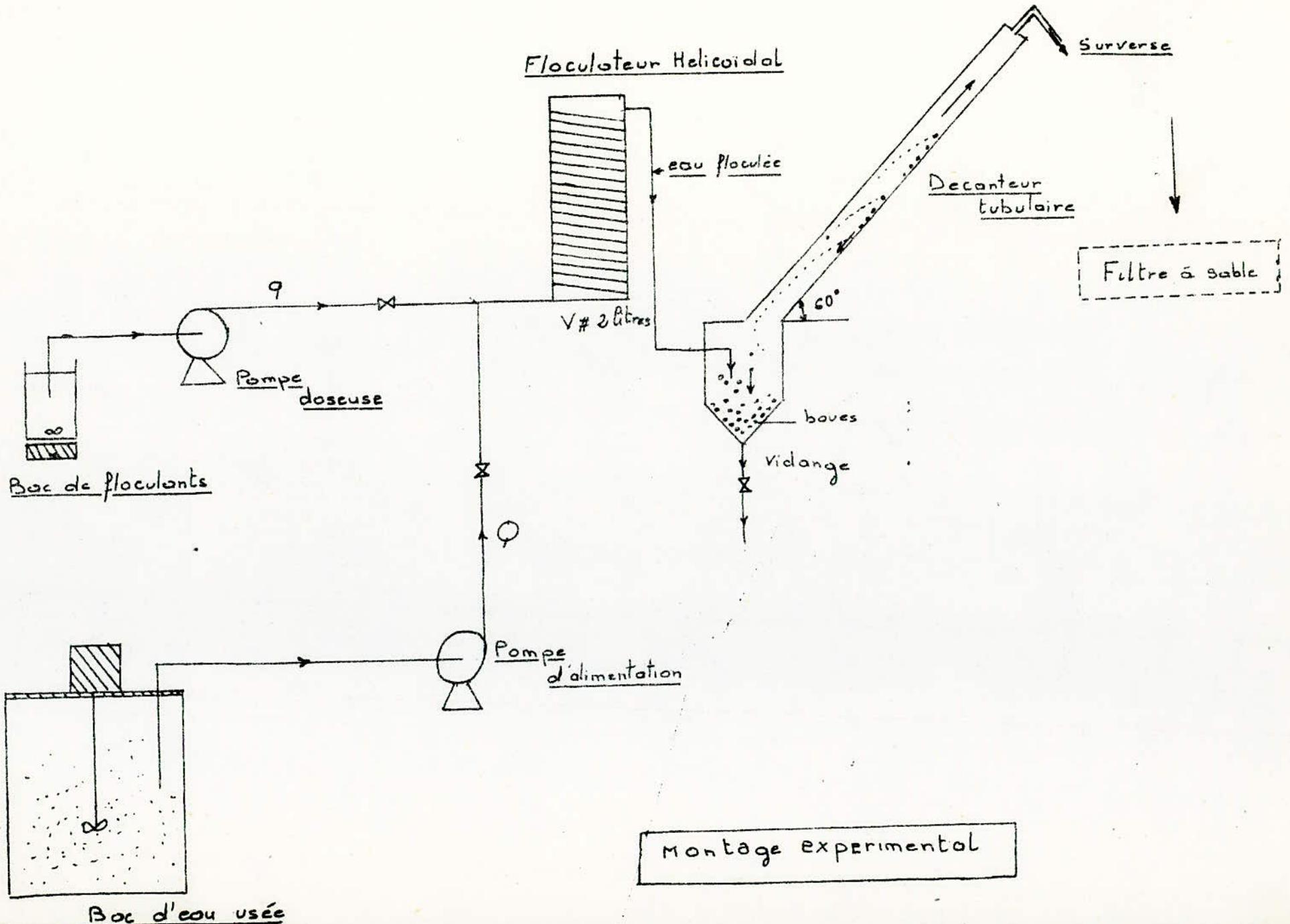
- Les decanteurs rectangulaires présentent l'avantage de permettent une implantation plus ramassée des différentes unités de traitement, mais leur coût est généralement plus élevé.



Zones de sédimentation



Courbe de Kynch



V- Montage Experimentale

V-1 Description du montage expe

La fig(a) represente un schema du montage experimentale compo- rtant

- un bac, contenant l'echantillon à analyser de capacité de 50 litres.
 - un petit bac de 1 litre contenant le floculant en solution.
 - un floculateur helicoïdal à tube circulaire, disposé en helice à l'entrée duquel on introduit l'eau à traiter et le reactif.
- On recueille à la sortie un melange floculé qui peut rapidement decanter dans le decanteur à tube incliné.
- un decanteur à tube incliner constitué d'une première partie à écoulement ~~so~~-Courant et d'une seconde partie à écoulement contre courant.

Les autres caracteristiques sont:

- Volume du floculateur V = 2 litres
- Volume du decanteur V = 4 litres

Ceci permet d'avoir un temps de decantation double au temps de floculation.

- diametre du tuyau, constituant le floculateur helicoïdal utilise lors de nos essais est de 14 cm m
- Ce tuyau a été déposé en helice autour d'un cylindre de dia- metre externe 12 cm
- le tube incliné a un diametre interne de 5 cm, dans la partie inferieure de decanteur se trouve une fosse à boues dont le volume est consideré comme un volume mort qui n'a aucun effet sur le calcul du temps de passage dans le decanteur.

V-2 Fonctionnement du pilote

L'alimentation en eau usée s'effectue en continu grâce à une pompe d'alimentation placée à l'oval du système.

Une pompe doseuse commandée electriquement ajoute le reactif à l'eau à traiter: la formation de floes se produit lors du passage dans le floculateur helicoïdal.

La plus grande partie de la decantation intervient dans le tu- be à écoulement ~~C~~ Courant

- La vidange des boues produites peut s'effectuer manuellement.
- Debit de la pompe d'alimentation varie de 0-150l/H.

- Debit de la pompe doseuse.

V-3 Caracteristique hydrauliques du flocculateur helicoïdal

- Volume effectif $V = 4000 \text{ cm}^3$

- Dans un premier temps, on fixe le debit moyen de l'alimentation à 25 l/H, on fait une serie d'experiences en faisant varier la concentration en flocculants ($F_e \text{Cl}_3$).

- Dans un second temps on fait varier le debit, en fixant la concentration en flocculants correspondant à l'optimum à l'elimination de la pollution.

- debit moyen $Q = Q + q \text{ (cm}^3 \cdot \text{s}^{-2})$

$Q \gg q$

- temps de flocculation $t_f = \frac{V}{Q}$ (s)

- vitesse moyenne $V = \frac{Q}{S} = \frac{Q \cdot 4}{d^2}$

- diametre interne du tube $d = 1,4 \text{ cm}$.

- Calcul du gradient de vitesse G

- Connaissant Reynolds $Re = \frac{edv}{\nu}$, on se reporte à la courbe donnant $\frac{Le}{L} = f \left(Re \left(\frac{d}{de} \right)^{1/2} \right)$, on obtient la valeur de $\frac{Le}{L}$ d'où la valeur de G gradient de vitesse dans le flocculateur helicoïdal

$$G = 5,66 \frac{v}{d} \frac{Le}{L}^{1/2}$$

Voir tableau (5)

Dans la pratique de la flocculation aussi bien enbatch(Jar Test) qu'en conditions reelles (station d'epuration des eaux), de nombreux auteurs ont proposé une zone optimale de variation de G Comprise entre 30 et 60 s^{-1} ce qui conduit à une valeur d'un produit sans dimension G.t de l'ordre 10^4 à 10^5 (Munsir) ref (13)

V-4 Caracteristiques hydrauliques du decanteur associe au dispositif floc Test.

- Volume effectif $V = 4000 \text{ cm}^3$

- diametre du tube $d' = 5,0 \text{ cm}$

- debit moyen $A = Q + q \text{ (cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$

- temps de decantation $t_d = 2t_f$ (s)

- vitesse moyenne $V = \frac{Q}{S'} = \frac{4}{d'^2} Q$

Voir tableau (6)

Caractéristiques hydrauliques du fluideur hélicoïdal diamètre = 1,4 cm

D (cm/2)	A_s Proelation (Δ)	V (cm ³ /s)	Re	$Re \left(\frac{d}{d_0}\right)^{1/2}$	$\frac{L}{d}$	G (kg ⁻¹)	$G \cdot L_f$
6,67	300	4,33	606	196	2	24,76	74,28
5,55	360	3,60	504	163	1,8	19,53	70,31
4,17	480	2,71	379	128	1,7	14,28	68,54
3,33	600	2,16	302	99	1,4	10,33	64,98
2,78	720	1,80	252	81	1,3	8,30	59,76
2,38	840	1,55	217	70	1,2	6,86	57,62

Tableau 5

Caractéristiques hydrauliques du récipient à tube incliné diamètre = 5 cm

A_d (m)	Q (cm ³ /s)	Re	$D = \frac{Q}{(cm^3/s)}$
600	6,67	960	0,34
720	5,56	960	0,38
840	4,17	105	0,21
1200	3,33	85	0,17
1440	2,78	70	0,14
1680	2,38	60	0,12

Tableau 6

VI Etudes Experimentales.

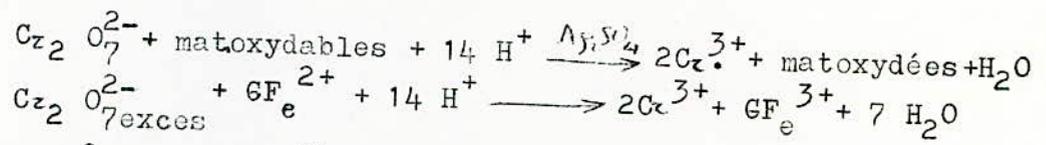
VI 1- determination de la D.CO

C'est la quantité d'oxygène en mg/l, consommée par une eau et mesurée par reduction du bichromate de potassium en milieu acide et à l'ebullition sous reflux pendant deux heures.

Elle est relative à l'ensemble des matières reductrices presentes dans une eau de nature minerale ou organique et susceptibles d'être oxydées chimiquement.

L'echantillon est bouilli en milieu fortement acide en presence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure avec un excès de bichromate de potassium pendant un certain temps pour oxyder les matières oxydables de l'eau.

La quantité de bichromate de potassium utilisée est déterminée titriquement par le dosage de l'excès, avec une solution d'ammonium fer (II) sulfate $(NH_4)_2 Fe (SO_4)_2 \cdot 6 H_2 O$



Alors $(C_{x_2} O_7^{2-})_{total} = Fe^{2+} + \text{matioxydables}$

Expression des resultats

La demande chimique en oxygène est exprimée en mg d'oxygène par titre, et est égale à

$$D.C.O = \frac{8.000 (a-b)}{v} \text{ xt } \text{ mg d'O}_2/\text{litre}$$

b = quantité nécessaire de la solution de $Fe (NH_4)_2 (SO_4)_2$ pour obtenir le virage rouge violace : (ml)

a = procedes aux mêmes operations avec 20ml d'eau distimée, O =

Consommation de $Fe (NH_4)_2 (SO_4)_2$ pour avoir le virage violacé: (ml)

t = teneur de $Fe (NH_4)_2 (SO_4)_2$

t = 0,15 N

v = volume de l'echantillon (ml)

Durant toutes les experiences, les valeurs suivantes sont maintenues constantes.

v = 10 ml

a = 17,5 ml

t = 0,15 N

VI-2 -Dosage de l'azote "Kjeldahl"

Principe.

L'azote Kjeldahl est le total de l'azote ammoniacal et l'azote organique. L'azote organique rencontré dans l'eau est principalement constitué par des protéines, des polypeptides et des acides aminés. Le dosage de l'azote Kjeldahl permet la détermination de l'azote de ces produits ainsi que l'azote ammoniacal présent, mais ne dose pas l'azote des nitrates et des nitrites. Des composés aromatiques et hétérocycliques avec des atomes d'azote ne sont déterminés que partiellement avec cette méthode. La teneur en azote organique peut être obtenue par déduction faite de l'azote ammoniacal déterminé séparément de l'azote Kjeldahl.

Les matières organiques sont détruites avec de l'acide sulfurique et en présence d'un catalyseur pendant la destruction, l'azote organique est transformé en azote ammoniacal. L'ammoniac formé pendant la destruction (et l'ammoniac ou azote ammoniacal déjà présent) est distillé de la solution en milieu alcalin, et recueilli dans un tampon borique; puis titré par une solution d'acide sulfurique.

Expression des Resultats

La teneur en azote Kjeldahl, exprimée en mg azote/litre.

$$N_{Kjeldahl} = \frac{14000 (a-b)xt}{v} \quad \text{mgN/l}$$

où v = volume de l'échantillon

t = teneur en H₂

a = consommation, en ml d'H₂, jusqu'au virage rouge faible

b = consommation, en ml d'H₂, en utilisant de l'eau distillée dans les mêmes conditions.

Valeurs gardées constantes pendant toutes les expériences

v = 25 ml

t = 0,02 N

b = 0,05 ml

VI-3 Détermination des phenols

On extrait les H.C contenant les phenols à l'éther diéthylique, ensuite on ajoute de l'hydroxyde de sodium. Les phenols passent, à l'état de phenates solubles.

On decante la phase aqueuse contenant les phenates. On neutralise, on ajoute du bromure de potassium et on acidifie, on porte au bain marie à 25°C on ajoute du bromate de potassium et on laisse reposer à 25°C pendant 1 heure tout en agitant. Ensuite on ajoute l'iode de potassium. Le melange est abandonné pendant une demi-heure à 20°C.

On titre l'iode liberé, correspondant aux derives bromés formés à partir de composés hydroxyles de la solution, par la solution de thiosulfate de sodium.

expression des resultats

Soit n_1 = nb de millilitre de thiosulfate de sodium utilisé pour le dosage de l'échantillon.

n_2 = nb de millilitres de thiosulfate de sodium utilise pour le dosage du temoin.

v = volume de la prise d'eau initiale

La teneur en phenols, exprimée en milligrammes par litre d'eau, est donnée par l'expression.

$$t_{\text{phenols}} = \frac{(n_1 - n_2) \times 1,567 \times 1000}{v} \quad (\text{mg/l})$$

VI-4 Determination des HC.

On fait une extraction des H.C à l'ether diethylique, ensuite on filtre sur papier filtre et après evaporation de l'ether on pese les hydrocarbures restants au fond du becher. Leur composition peut être determinée par analyse chromatographique.

Expression des resultats.

Soit.

PE = poids de la prise d'essai en mg

P = poids des hydrocarbures en mg obtenu.

La teneur en hydrocarbures, exprimée en milligrammes par litre d'eau, est donnée par l'expression.

$$t_c = \frac{P \times 10}{P.E}$$

VI.2 Determination de la concentration optimale en FeCl₃

VI 2 - 1 Protocole expérimental

Nous prelevons une quantité suffisante d'eau usée (50 litres environ) pour effectuer l'essai sur le pilote d'épuration. Les prelevement se font à peu près à la même heure, afin de respecter les mêmes conditions de travail pour chaque échantillon et d'éviter d'éventuelles variations de concentration en agents polluants.

Nous mesurons, à chaque prise d'échantillon, son pH et sa température. Ensuite nous passons l'échantillon d'eaux usées dans le pilote d'épuration en gardant un temps de floculation constant de 5 minutes, en fixant les débits des deux pompes.

Enfin de manipulation, nous analysons l'eau à l'entrée et à la sortie du pilote d'épuration.

VI.2.2 Resultats

Les valeurs déterminés pour la D.C.O; Azote total, les plombs et hydrocarbures, ainsi que les rendements d'éliminations calculés pour chaque mesure, en fonction de la concentration du flocculant (C.C en Fe Cl₃ en mg/l) sont représentés par les tableaux (1 et 2) et les courbes 1 - 2 - 3

VI.2.3 Interpretation

Nous constatons qu'il existe une zone de concentration optimale en Fe Cl₃ correspondant à chaque mesure.

	Zone de la concentration optimale de $FeCl_3$	Rendement d'épuration
D C O	75 et 83	21 % et 34 %
Azote total	17,5 et 83	58 % et 73 %
Phenal	69 et 75	67 % et 90 %
H.C.	70 et 80	25 % et 40 %

On a pris en compte les zones de concentrations optimale qui coïncident le mieux pour les 4 paramètres.

Etant donné que l'élimination d'H.C et les phenals est la plus importante dans notre cas, on se base sur les rendements d'épuration obtenus pour les H.C et phenals pour déterminer la concentration optimale.

On constate, alors, que la valeur de 75 p.p.m. donne un bon rendement d'élimination pour les H.C , phenals et D.C.O

En ce qui concerne l'Azote total, la quantité contenue dans l'eau usée est acceptable (voir normes de rejet) teneur en Azote total 10 ppm.

VI - 2 - 4 - Conclusions

Les efficacités d'élimination obtenues pour la D.C.O sont médiocres, pour les phenals et Azote sont assez bonnes, ainsi que pour les Hydrocarbures dans les zones de concentrations optimales correspondantes.

VI.3. Influence du temps de floculation sur l'élimination des agents polluants.

VI 3 - 1 Protocole expérimental

On a pris les mêmes considérations que dans la première partie. Mais cette fois ci sur une même eau usée, on a effectué plusieurs essais (4 temps de floculation différents 5,6,8 et 14 mn) afin d'obtenir des résultats plus représentatifs. Cette opérations a été repeter deuxième fois pour 3 temps de floculation différents 10 - 12 - 16 minutes.

VI 3.2. Resultats;

Les resultats mesures pour la D.C.O ; Azote total, les phenals et H.C., ainsi que les rendements d'elimination calcules pour chaque mesure, en fonction du temps de floculation (en minutes) sont representes par les tableaux 3 et 4 et les courbes 4,5,6,7.

VI -3.3 Interpretation

Nous constatons une augmentation du rendement d'elimination avec le temps de floculation, jusqu'à un palier constant correspondant à chaque mesure (voir les courbes 4,5,6,7 à partir de $t_f = 14$ mn)

Concentrations en Fe cl₃ = 75 p.p.m constante

	Temps de floculation optimum (mn)	rendement d'epuration (%)
D.C.O	14	82,5
Azote total	14 "16"	65 "70"
phenal	14	84
H.C	14	60

VI 3 - 4 Conclusion

Les rendements d'epuration obtenus pour les quatres paramètres pour un temps de séjour de flocculateur de 14 minutes sont acceptables. Au delà de ce temps l'efficacité reste constante d'après les courbes 4,5,6,7

On constate que pour deux échantillons initiaux différents l'efficacités ne sont pas les mêmes, mais ils tendent vers une même limite à $t = 14$ minutes.

VII - Methode de Jar Test

Le Jar-test reste le procede privilegie pour la determination au laboratoire des doses optimales de floculant .Il semble que les concentrations ainsi determinees soient utilisables pour une floculation suivie d'une decantation .

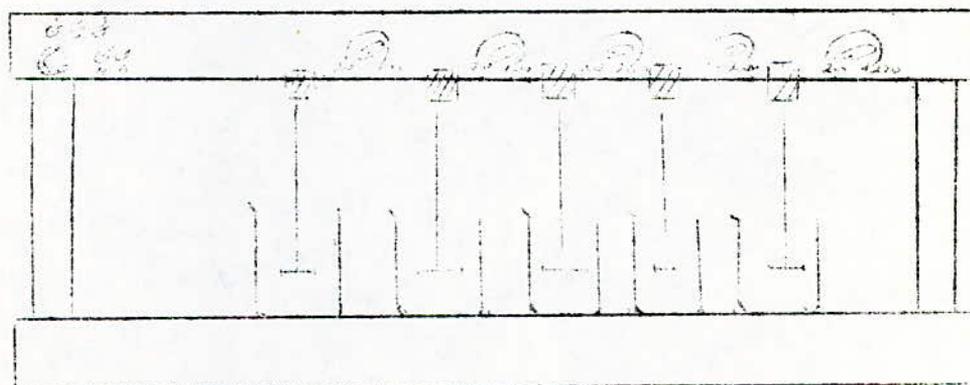
On utilise dans ce cas un agitateur a plusieurs positions appele Jar-test ou flocculatur

—Remplir les cinq bechers du flocculateur d'un litre d'eau usee a analyser

—Ajouter le floculant sous agitation rapide soit 100tours/mn pendant un temps assez court , pour le disperser

—Agiter pendant quelques minutes a vitesse lente .

Comparer les divers produits entre eux et a divers dosages en ce qui concerne la taille des floes , la clarification du surnageant et la vitesse de sedimentation



Flocculateur de Laboratoire

VII—I- Protocole experimental

—Nous avons place quatre grands bechers en serie dans lesquels nous avons mis 1litre d'eau a tester

—Nous avons utilise comme moyen d'agitation des agitateurs magnetiques car ils etaient plus disponibles.

—Nous avons ajoute le $FeCl_3$ sous agitation rapide pendant 10 secondes environ (differentes concentrations en $FeCl_3$)

—Ensuite nous avons laisse le tout pendant 15 minutes sous agitation lente.

—Enfin , nous avons laisse decanter pendant 30 minutes.

VII—2- Observations visuelles

—Nous avons utilise des concentrations en $FeCl_3$ de 100, 75, 60 Et 50p.p;m dans chacun des bechers precedents.

—Nous avons constate ,pour une concentration de 60 ppm ,les flocons chimiques etaient plus volumineux ,par consequent la decantation etait mieux marquee d'ou clarification du surnageant meilleur que les trois autres essais

—En ce qui concerne les solutions correspondantes à 50 et 75 ppm , elles avaient à peu pres même aspect

—Pour la concentration de 100ppm ,le surnageant etait beaucoup moins clair .

VII—3- Etude de l'efficacite d'elimination des H.C par INFRA ROUGE

Pour cette etude , nous avons utilise la methode "AFNOR".dont l'applicatoion est la suivante:

—Nous avons determine , dans un premier temps, la teneur en H.C dans l'echantillon initial (voir paragraphe VI- I -4) .Nous avons obtenu une teneur de 500ppm en H.C ,soit 6,5 g de H.C, que nous avons dilue plusieurs fois à l'aide du tetrachlorure de carbone ,afin de pouvoir determiner la courbe d'etalonnage à l'infra rouge

—Nous avons pris, dans un deuxieme temps, une quantite d'eau traitee sur Jar-test ,equivalente à l' echantillon initial. A cette quantite nous ajoutons de l'acide chlorydrique, afin d'amener le PH à 5, nous ajoutons aussi 5g de chlorure de sodum et 50 ml de tetrachlorure de carbone On bouche le flacon et nous agitons pendant 15 minutes à grande vitesse à l'aide d'un agitateur magnetique de façon à distribuer le tetrachlorure de carbone au sein de l'echantillon.

On laisse decanter 10 mn. On filtre la phase de tetrachlorure de carbone, sur papier filtre dans lequel à ete prealablement introduit un gramme de sulfate de sodum.

Le dosage des H.C à ete fait par le spectrophotometre à infra rouge.

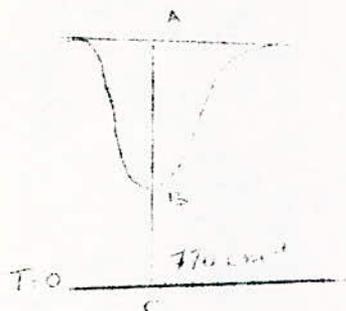
A cet effet nous avons choisi un pic caracteristique qui se situe à une longueur d'onde de 770 cm^{-1} (qui apriori peut correspondre au noyau benzenique monosubstitue; mais on n'a pas tous les elements nece-

essaires pour pouvoir donner une confirmation)

VII-4- Resultats et calculs

Le tableau (c) et la courbe (I) donnent la variation du rendement d'elimination en fonction de la concentration en flocculant

Pour le calcul de la densite optique nous avons procede comme suit:



$$D = \text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

AC est proportionnel à I_0 .

BC est proportionnel à I

ou

I_0 = intensite initiale du faisceau

I = " " " apres passage par la solution

Tableau correspondant à l'etalonnage à partir de l'échantillon initial

H.C (ppm)	50	100	200	300	500
$D = \text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right)$	0,73	1,15	1,38	1,48	1,95

Tableau (a)

Après analyse sur spectrophotometrie à Infra-rouge, nous avons mesure la densite optique et nous avons determine le pourcentage en poids en hydrocarbures correspondant, à l'aide de la courbe d'etalonnage (courbe 10)

$F_e \text{ Cl}_3$ (ppm)	50	60	75	100
$D = \text{Log}\left(\frac{I_0}{I}\right)$	1,61	1,38	1,45	1,86
H.C (ppm)	310	230	250	387

Tableau (b)

Tableau des efficacites

$F_e \text{ Cl}_3$ (ppm)	50	60	75	100
Eff (%)	38	54	50	22,5

VII-5- Interpretation

Nous avons reporte l'efficacite d'elimination en H.C en fonction de la concentration en flocculant de F_eCl_3 sur la courbe (I), afin de pouvoir faire une comparaison entre la methode par Jar-test, et celles relatives aux conditions reelles sur pilote en controle continu.

Nous constatons que les courbes obtenues $Eff(H.C) = F(c.c \text{ en } F_eCl_3)$ ont apeu pres meme allure, et par consequent la zone correspondant aux concentrations optimales en F_eCl_3 pour les deux courbes coïncident (soient entre 60 et 75ppm) qui donnent une efficacite d'elimination de 55%.

VII-6- Conclusion

Nous pouvons conclure que la methode par Jar test et dans certains cas indispensable pour determiner rapidement les concentrations optimales en flocculant avant de passer sur pilote d'epuration mais pour cela il faut effectuer plusieurs essais a des temps differents de la journee, ce qui demande des techniciens en permanence. Par contre le pilote que nous avons utilise en controle continu, si on lui ajoute un systeme de regulation de telle facon qu'il puisse exister un lien entre le debit des pompes (pompe doseuse par exemple) et la concentration en polluant de l'effluent a epurer; ce systeme n'exigerait qu'un technicien en plus et assurerait en plus un rendement equivalent a celui du Jar-test.

Il aurait ete interessant d'identifier les H.C existants dans l'effluent aqueux (echantillon initial) mais ceci pourrait faire l'objet d'un projet de fin d'etudes, neanmoins nous savons que la majorite des produits petroliers presente dans l'eau de rejet est due en grande partie au brut (a cause des fuites, lavage de des alour, prelevement d'echantillons, purge, etc;..) qui est compose d'une large gamme d'hydrocarbures tels que

- les paraffiniques
- les naphtheniques

-les olifoniques

-les aromatiques

Nous pouvons trouver ,aussi, des produits (ex: kerosene) mais en en quantite infime.

VII--7- Etude microphotographique

Nous avons pris quelques photos au microscope electronique à transmission des flocons chimiques , afin de pouvoir deceler la nature des liens entre le gel d'hydroxydes ferriques et les agents polluants (les hydrocarbures surtout).

Malgre la difficulte de l'interpretation de ces photos ,on constate une region foncée dominante qui semble être l' hydroxyde de fer et une region claire incluse dans la region foncée qui ne doit être que les H.S ou phenols (car ce sont les agents polluants les plus dominants) .d'autre part l'agglomeration est mise en evidence sur ces photos

Il aurait été plus interessant d'utiliser un microscope à balayage (pas disponible) car il aurait pu nous donner des renseignements plus poussés sur la structure des flocons chimiques .

Conclusion Générale

La première idée qui avait dominé lors du démarrage de cette étude était de trouver les conditions optimales en flocculants et temps de séjour correspondant à un rendement d'élimination le plus grand, en agents polluants tels que les H.C et phénols surtout, pour le dispositif utilisé en continu.

Nous avons utilisé comme flocculant le Fe cl₃ chlorure ferrique car c'est le composé habituellement utilisé dans le traitement des eaux hu^lieuses. Il nous a paru plus intéressant de fixer le taux de traitement optimal obtenu et d'étudier les variations du temps de séjour du flocculateur en fonction du rendement d'élimination.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure comme suit :

1)° Nous avons vu que pour les agents polluants testés qu'il existe des différences de rendement au niveau d'élimination suivant la dose de flocculant utilisée. De là on a déterminé la concentration en Fe cl₃ optimale à partir de laquelle le rendement n'augmente plus. Et dans le cas d'un surdosage (il se produirait) le phénomène inverse, une diminution de l'efficacité qui est due à une restabilisation des colloïdes ce qui entrainerait une mauvaise séparation liquide solide ref (22).

- D'autre part les courbes d'efficacité obtenus pour la D.C.O et les H.C ont une allure à peu près identique, d'ailleurs ils suivent en première approximation une loi linéaire, selon la courbe (8) dont l'expression est

$$(1) \quad \frac{Eff_{H.C}}{Eff_{D.C.O}} = 0,63$$

Donc il suffit de déterminer la D.C.O, et de déduire l'efficacité en H.C o inversement.

Remarques

On constate que certains points ne vérifient pas la linéarité de la relation (1). Cela est du au fait que la D.C.O est une grandeur qui dépend des conditions biologiques, elle évolue avec le temps et comme nous ne pouvions pas les faire les analyses sur place et immédiatement, ce qui explique notre marge d'erreur. (C - a - d les écarts entre les points de la courbe), par contre la teneur en hydrocarbures ne varie point avec le temps .

2°) - Comme nous le pensons, l'élimination des agents polluants est due à un phénomène d'adsorption (ou fixation) sur les flocs chimiques alors la quantité éliminée est fonction du temps de floculation et atteint une limite correspondant à l'équilibre phase adsorbée phase dissoute ref(25) Par exemple dans le cas des hydrocarbures on voit que lorsqu'on passe de 5 à 14 minutes le rendement d'élimination varie de 40% à 60% par contre de 14 à 16 mn le rendement d'élimination est pratiquement constant. Nous supposons que l'équilibre d'adsorption est atteint.

3°) On constate qu'il existe un temps de floculation optimum au delà duquel l'efficacité ne change pas, mais il reste stable.

Il existe d'autre part, une relation identique à la (1) entre la D.C.O et E. Cette relation est définie par une pente de

$$(2) \quad \frac{\text{Eff}_{\text{H.S}}}{\text{Eff}_{\text{D.C.O}}} = 0,55$$

donc il suffit de connaître (ou de fixer) une seule grandeur pour déterminer l'autre.

4°) Quelle est l'importance du temps de séjour du flocculateur ?

Le temps de séjour de floculation est lié au débit et au volume du réacteur $T = \frac{Q}{V}$. Alors la connaissance de l'optimum peut nous donner une idée du dimensionnement de l'installation physico-chimique et par conséquent le coût d'investissement de cette installation.

5°) Nous pouvons penser éventuellement utiliser un autre flocculant tel que le P.S.A polychlorure basique d'aluminium qui semble être aussi efficace que FeCl_3 ref(23). Mais comme ce produit n'est pas produit sur place nous préférons nous orienter vers l'utilisation d'un sous produit de l'industrie, comme le FeSO_4 , produit à Annaba (S.N.S).

6°) Notre choix pour le FeCl_3 a été fait

a- pour son efficacité de desbuilage meilleur que les sels d'alumine selon la littérature ref(17)

b- pour le fait qu'il donne peu de déchets solides (boues)

Il existe quand même un inconvénient: un excès de ce produit entraîne une couleur jaune rouille.

7°) La Raffinerie d'Alger utilise, l'eau soutirée de la nappe phréatique (eau potable) pour subvenir à ses besoins en eau. Mais vu la quanti-

te considerable d'eau consommée par jour (soit "306 m³/h"), ou encore un litre d'eau pour quatre litres de brut, il est indispensable que des dispositions soient prises, pour éviter une pollution considerable de l'environnement (zone agricole, risque de sterilité du sol, avec deperdition de la vegetation).

D'après les résultats obtenus, les normes de rejet imposées par des organismes internationaux sont loin d'être respectées. Les eaux de charge de toute industrie pétrolière doivent satisfaire les normes suivantes soient

- phenol pps20max
- P.H5,5-10;6
- H.C ppm15 max
- D.C.O90 max

Nous pensons, donc qu'une installation d'épuration physico-chimique au niveau du bassin de decantation serait intéressante (il n'existe aucun système d'épuration à ce niveau).

Une fois l'eau épurée, il serait intéressant, au lieu de l'évacuer dans la rivière, de la recycler, et l'utiliser à des fins bien précises telles que le lavage des dessaleurs ou encore pour les circuits de refroidissements de diverses installations.

En général pour qu'une raffinerie de pétrole (nouvelle) évite une grande consommation et pollution d'eau il faut :

1- utiliser le refroidissement par air partout où c'est praticable et économique.

2- système tempéré d'eau (mélange eau-glycol) fournit un refroidissement pour les pompes.

3- le recyclage de l'eau doit être assuré partout où il est possible par exemple :

Les eaux sales de distillation sont utilisées comme eau de lavage du dessaleur.

Notre choix pour cette méthode a été orienté :

- pour sa souplesse et simplicité d'emploi
- pour sa bonne efficacité
- pour son temps de séjour court
- pour sa compacité

Quel est l'avantage du Floc-test ?

Ce système a pour principal avantage de travailler en contrôle continu. C'est à cette fin que le flocculateur hélicoïdal a été conçu

et étudié .Le flocculateur rectangulaire classique est moins pratique, car on est obligé dans ce cas d' utiliser une pompe pour passer au decanteur .Lors de ce transfert on risque de casser le floc (s) chimique(s) qui est tres fragile(s) , ce qui entraine une mauvaise decantation .

L'avantage du decanteur à tube incline est explique par le fait suivant : en plus de la decantation gravimetrique , on a une decantation diffuse dans le tube incline , ce qui permet la sedimentation des fines particules .

7°) On constate , que même après , traitement les eaux de surverses sont loin d'avoir les qualites exigees par les normes , pour cela nous proposons un traitement

- soit un recyclage de la surverse avec automatization du systeme
- soit un dedoublement de l'installation
- soit utilisation de produits à haut pouvoir d'adsorption visà

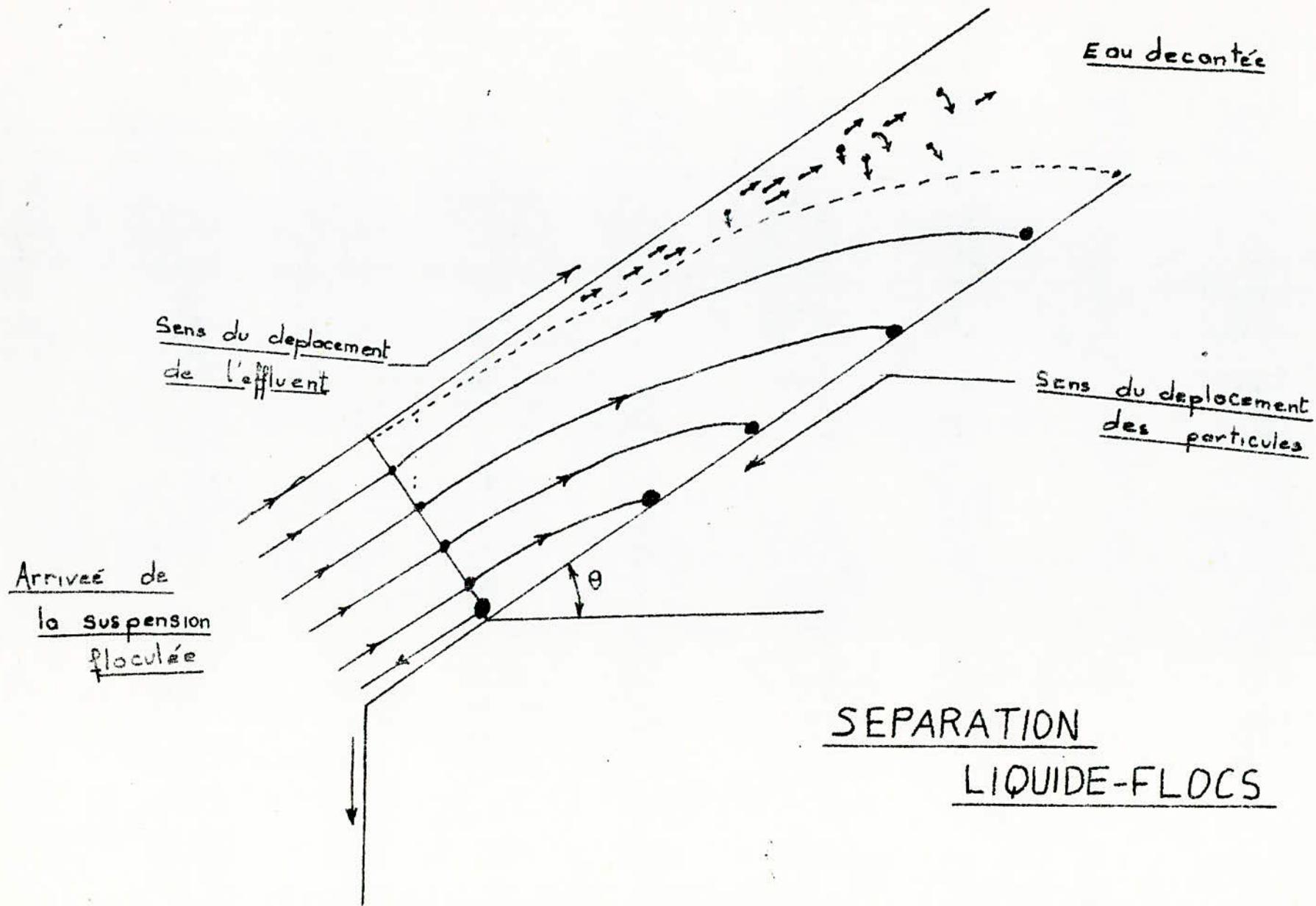
vis des hydrocarbures ref(I7)

- | | | |
|----------------------|---|----------------------------|
| - le laitier expanse | } | <u>PRODUITS MINERAUX</u> |
| -les diatomes | | |
| -la poudre de craie | | |
| ← farine de bois | } | <u>PRODUITS ORGANIQUES</u> |
| -le foin | | |

Il faut que les ou le produit-utilise soit un sous produit de de l'industrie Algerienne ,et doit donner une quantite faible de dechets

—nous suggerons un traitement biologique qui se superpose au traitement physico-chimique

8°) Le montage qui aete realise pour cette etude ,pourra faire l'objet de travaux pratiques pour l' etude de transfert de matiere .



A N N E X E

- BIBLIOGRAPHIE -

LIVRES

(1) -CHURCHILL P.S, GRAY T.W
 "Up rating hydraulically over loaded sedimentation tank
 by inclined plates"
 Effluent and water treatment Journal 1975, PP 76-81

(2) ENSCHILLER GUY
 "Chimie physique "
Equilibres en solution -phenomenes de surface tome II, IX
 1961; PP903-912

(3)- FAIR; GEYER ; OKUN
 "Water and waste water engineering "
Water purification and waste water treatment and dispos-
able Vol II; PP28-449

(4) -FORSELL B HEDRTRUM M.B
 "Bamella sedimentation , a compact separation technique "
 Journal W.P.C.F, 1975, PP834-842

((5)-HAZEN.A,
 "On sedimentation "
 American Society of Civil Engrs 1904, PP45 -88

(6)-HUISMAN L
 "Defelt university of technologie "
Sedimentation and flottation, 1973

(7)- KELLIH .A
 "Decantation en tubes inclines -Application à l'epuration
 physico- chimique "
 These 3^{eme} cycle - USTL- 1978 Decembre; P 84

(8)- KETTAB
 "traitement des eaux usees d' Annaba"
 These d'ingeniorat agronomique , 1977

(9) -KYNCH G.H
 "A theory of sedimentation "
Transation of Faraday Society 1952 , PPI61-176

(10) - LARIAN M.G

"
Fundamentals of chemical engineering operations "
New work 1958 Prentice Hall
Technique de l'ingenier J 1530 ,P I-3

(11) - MEINCK. H. STOOFF ;H KOHLSCHUTTER

"Les eaux residuaires industrielles "
4^{eme} edition traduit par Andre Gasser ;1970

(12) - MER

"Coagulation symposium Introduction "
Journal of colloïd science ,1964 ? 19, PP291 -293

(13) - MUNSIR .A

"Mise au point d'une methode de contrôle en continu des
procedes de Flocculation- Decantation"
These de 3^{eme} cycle - U.S.T.L 1979 Octobre

(14) - VAN VLIET B.A

"The efficacy of inclined tube and plates modules in
high line clarification process "
Water Research 1977, PP783- 788

(15) - W. W ECKENFELDER Jr

" Leau dans l'industrie"
pollution traitement recherche de la quallite
traduit par P. Cluvier 1972 ;PP 96- 100

(16) - WUITHIER.P

"Traitement des eaux usees , bassins de decantation "
SERVICES AUXILIAIRES
Raffinage et genie chinique T II 1972 ,PP 1034 -1035

8888ICLES ET CONFERENCES

(17) - BERNE F (Societe Degremont)

"Publications de l' institut français du petrole "
Traitement des/residuaires dans l'industrie petroliere
eaux
1972; PPI7I -

(18)- BEN AIM
"Les procedes de separation liquide solide dans l'epuration
des eaux usees "
Communication personnelle

(19)- CEBEDEAU
" Guide pratique à l'usage des ingenieurs et techniciens "
Livre de l'eau 7/1972; PP60, 64

(20)- DEGREMONT
Memento - technique de l'eau 12^{eme} Edition 1972, PPI20-I29

(21)- F. FISSINGER
Techniques et sciences municipales, N° 4 -76/PI47
La coagulation: Errements anciens et connaissances nouvelles

(22)- WILLIAM A DREARY, PHD, PE
et STEPHAN P SHELTON, PHD, PE
"Contrôle et dosage de la coagulation chimique "PI5-I6

(23)- WEERENS .A.Dr.Sc
"LA floculation : principes et applications ""
Conference faite par la societe Royale Belge des ingenieurs
et industriels, les 29 mars et 5 avril 1974; PP45

(24)- THEBAUT.P ; CAGES JM ; F. FISSINGER
"Mechanismes d' action de l' elimination des micropolluan-
ts par les hydroxydes de fer et le P.C.B.A.]
Communication personnelle; P

(_____)

(25)- PAUL THEBAULT :
Elimination des matieres organiques et des micropolluants contenus dans
eaux de surface : Role et efficacite des coagulants mineraux"

Prise d'essai	D.C.O (mg/l)	Azote total (mg/l)	Phenols (mg/l)	Hydrocarbures (mg/l)	Eff _{O.C.O} (%)	Eff _{Nx} (%)	Eff _{Ben} (%)	Eff _{H.C} (%)	Fe Cl ₂ (p.p.m)
Avant essai	240 204	5,04	31,34	1631,4	16,59	44,44	20,00	26,00	100
Après essai	180 192	2,80	25,07	1207,2					
Avant essai	348	5,04	125,36	2854,6	6,89	22,22	12,50	49,01	90
Après essai	324	3,92	109,69	1455,4					
Avant essai	288 276	6,16	59,55	2408	23,40	72,72	5,27	25,49	80
Après essai	228 204	1,68	56,41	1794					
Avant essai	108 110	5,04	37,61 47,01	1434,89	33,94	20,23	66,67	40,09	75
Après essai	72 72	4,02	12,53 15,67	859,64					
Avant essai	132 120	8,40	0,21	734,65	9,52	13,33	90,01	24,69	70
Après essai	120 108	7,28	0,023	668,2					
Avant essai	1404 1320	5,04	2,22	6944,35	1,83	22,22	0	14,59	65
Après essai	1320 1356	3,92	2,22	5931,14					
Avant essai	132 120	8,40	42,01	3571,8	33,33	40,00	0	53,60	60
Après essai	84 84	5,04	42,01	1657,2					
Avant essai	240 204	5,04	31,34	1324,1	27,35	66,67	0	20,03	50
Après essai	168 156	1,68	31,34	1059,3					

Tableau 1

temps de séjour du flocculateur = 5 minutes

Variation du temps de séjour du flocculateur hélicoïdal

$t_{\text{floculation}}$ (m.n)		D.C.O (mg/l)	AZOTE TOTAL (mg/l)	PHENOLS (mg/l)	HYDROCARB. URÉS (mg/l)	Eff_{DCO}	Eff_{NH_4}	Eff_{BOD}	$Eff_{N.C}$
/	échantillon initial	108 110	5,04 5,04	37,61 47,01	1434,89	/	/	/	/
5	Après essai	72 72	4,02	12,53 15,67	859,64	33,94	20,23	66,67	40,09
6	Après essai	24 60	3,92	0 12,53	852,06	58,07	22,22	79,18	42,50
8	Après essai	40,50 41,5	2,8	0 12,53	791,05	62,50	44,44	79,18	44,87
14	Après essai	12 24	1,91	0 9,4	563,62	82,59	65,05	84,37	60,72
/	échantillon initial	204 156	3,92	47,01	869,01	/	/	/	/
10	Après essai	108 168	2,8	21,94	629,01	22,23	28,57	53,33	27,61
12	Après essai	108 156	1,68	18,80	479,89	26,12	57,17	60,00	44,78
16	Après essai	34,68 26,52	1,16	6,81	338,91	83	70,40	85,51	61

Tableau 2

Concentration en $F_2O_2 = 75$ p.p.m

Variation du temps de séjour du flocculateur

temps de séjour du flocculateur (mn)	date des essais	Heure de prélèvement d'échantillon	T ambiante (°C)	T échantillon (°C)	PH	Prises d'essai
	19-05-80	8 H 30	22	28	7,4	avant essai sur pilote
5	/	/	21	/	6,1	après essai sur pilote
6	/	/	21,5	/	6,7	
8	/	/	22	/	6,45	
14	/	/	22	/	6,5	
	24-05-80	9 H 00	22	25,5	7,8	avant essai
10	/	/	23	/	6,5	après essai
12	/	/	22,5	/	6,2	après essai
16	/	/	21	/	6,3	après essai

Tableau n°3

Concentration en $FeCl_3 = 75$ p.p.m

$FeCl_3$ (p.p.m)		P.H	Teneur en oxygène (ppm)	T° de l'échantillon initial (°C)	T° ambiante (°C)	Heure de prélèvement	Date des essais																																																																								
100	échantillon initial	7,25	/	27,5	22	9h30	10.05-80																																																																								
	échantillon après essai	6,3	/					90	échantillon initial	7,45	1,85	24,5	22	9h00	27.04-80	échantillon après essai	6,8	2,2	80	échantillon initial	7,1	1,1	23	21	9h00	29-04-80	échantillon après essai	6	2,8	70	échantillon initial	6,8	4,5	25,5	20	8h45	03.05-80	échantillon après essai	5,9	6	65	échantillon initial	9,6	/	28	22	8h30	14.05-80	échantillon après essai	8,4	/	60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80	échantillon après essai	6,9	6,8	50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22
90	échantillon initial	7,45	1,85	24,5	22	9h00	27.04-80																																																																								
	échantillon après essai	6,8	2,2					80	échantillon initial	7,1	1,1	23	21	9h00	29-04-80	échantillon après essai	6	2,8	70	échantillon initial	6,8	4,5	25,5	20	8h45	03.05-80	échantillon après essai	5,9	6	65	échantillon initial	9,6	/	28	22	8h30	14.05-80	échantillon après essai	8,4	/	60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80	échantillon après essai	6,9	6,8	50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/						
80	échantillon initial	7,1	1,1	23	21	9h00	29-04-80																																																																								
	échantillon après essai	6	2,8					70	échantillon initial	6,8	4,5	25,5	20	8h45	03.05-80	échantillon après essai	5,9	6	65	échantillon initial	9,6	/	28	22	8h30	14.05-80	échantillon après essai	8,4	/	60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80	échantillon après essai	6,9	6,8	50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/																	
70	échantillon initial	6,8	4,5	25,5	20	8h45	03.05-80																																																																								
	échantillon après essai	5,9	6					65	échantillon initial	9,6	/	28	22	8h30	14.05-80	échantillon après essai	8,4	/	60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80	échantillon après essai	6,9	6,8	50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/																												
65	échantillon initial	9,6	/	28	22	8h30	14.05-80																																																																								
	échantillon après essai	8,4	/					60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80	échantillon après essai	6,9	6,8	50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/																																							
60	échantillon initial	7,5	5	25	22	8h45	05.05-80																																																																								
	échantillon après essai	6,9	6,8					50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80	échantillon après essai	6,3	/	75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/																																																		
50	échantillon initial	7,2	/	27,5	22	9h30	07.05.80																																																																								
	échantillon après essai	6,3	/					75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80	échantillon après essai	6,1	/																																																													
75	échantillon initial	7,4	/	28	22	8h30	12.05-80																																																																								
	échantillon après essai	6,1	/																																																																												

Courbes 1

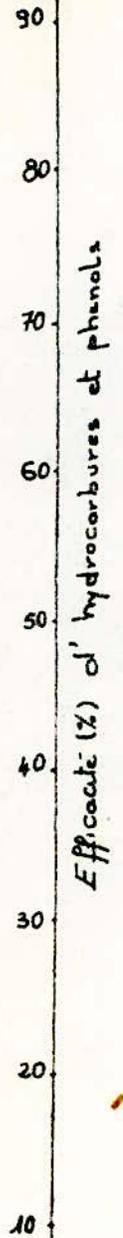
Variation de la concentration en $FeCl_3$

$$E_{\frac{OH}{OH}} = f(c.c. FeCl_3)$$

- (o) → H.C (Jar Test)
- (■) → c1ccccc1O
- (▲) → H.C (pilote)

$t_f = 5 \text{ mn}$

Efficacité (%) of hydrocarbures et phenols



$t_f = 5 \text{ mn}$

$E_{\text{eff}} = f(\text{c.c. } \text{FeCl}_3)$

Courbe 2

80

70

60

50

40

30

10

Efficacité (%) D.C.O

60

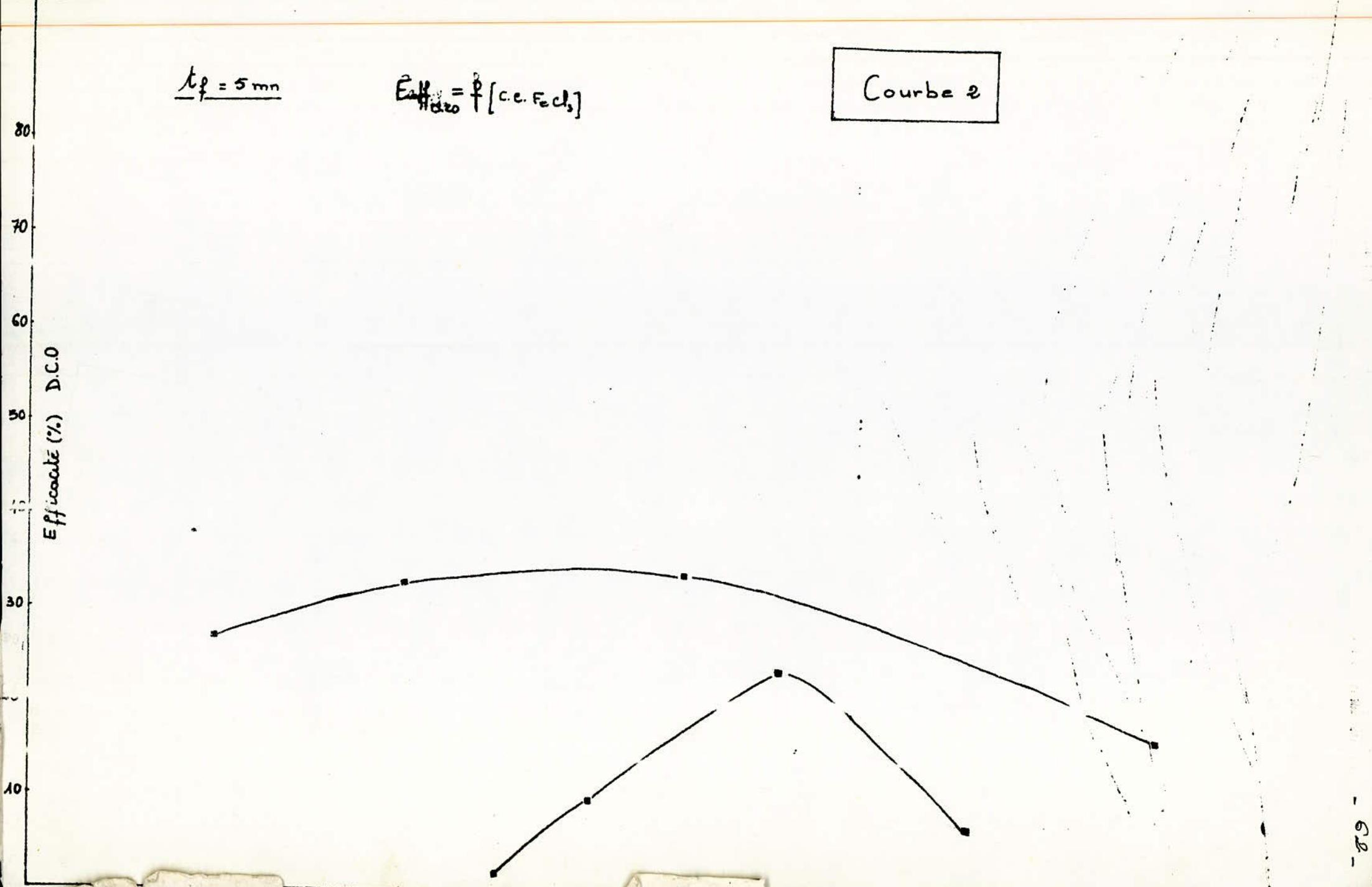
65

70

80

90

CC en FeCl_3 (ppm)



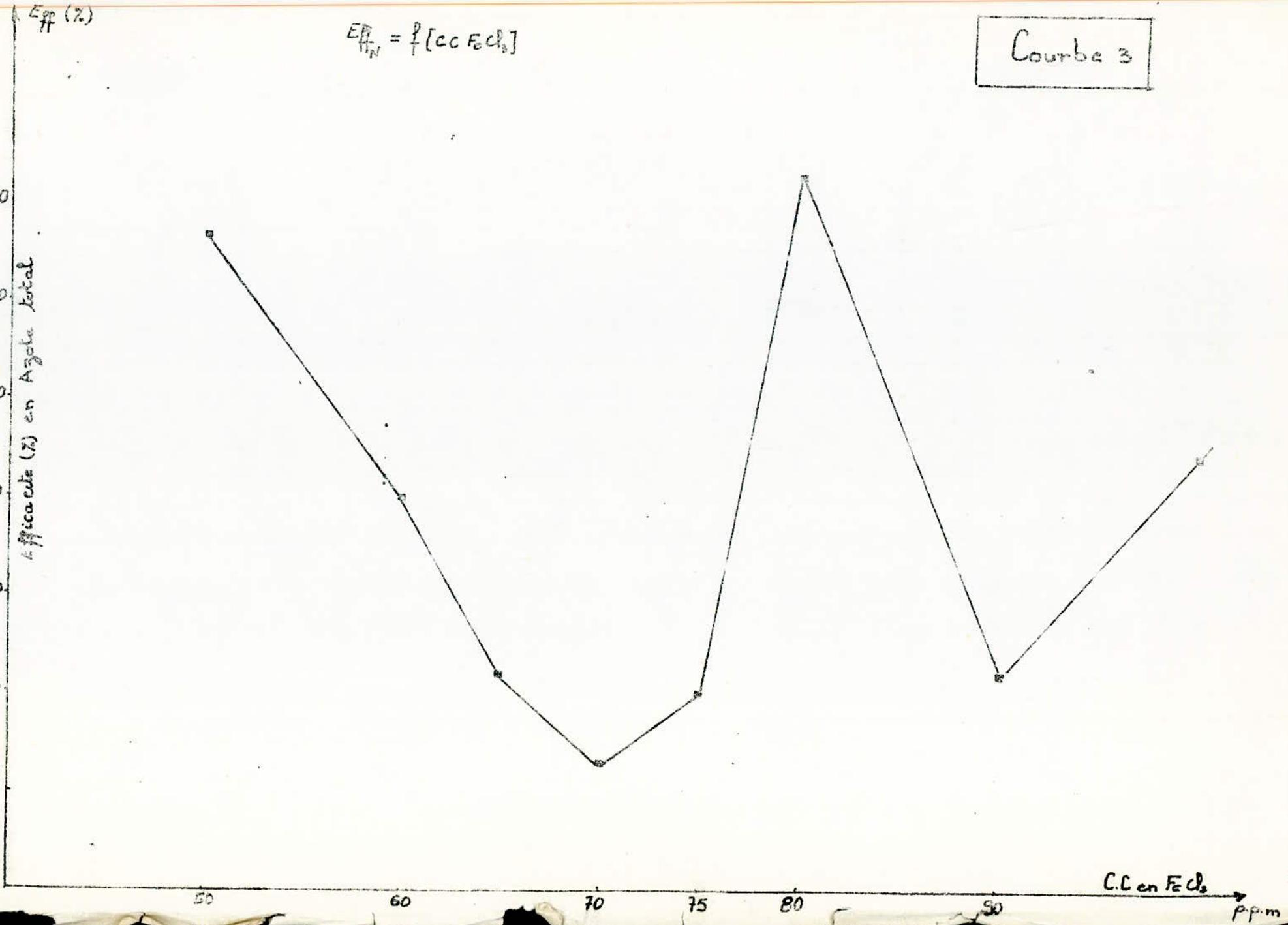
$E_{FF} (\%)$

$$E_{FF} = f [CC FeCl_3]$$

Courbe 3

Efficacité (%) en Azote total

70
60
50
40
30
20
10

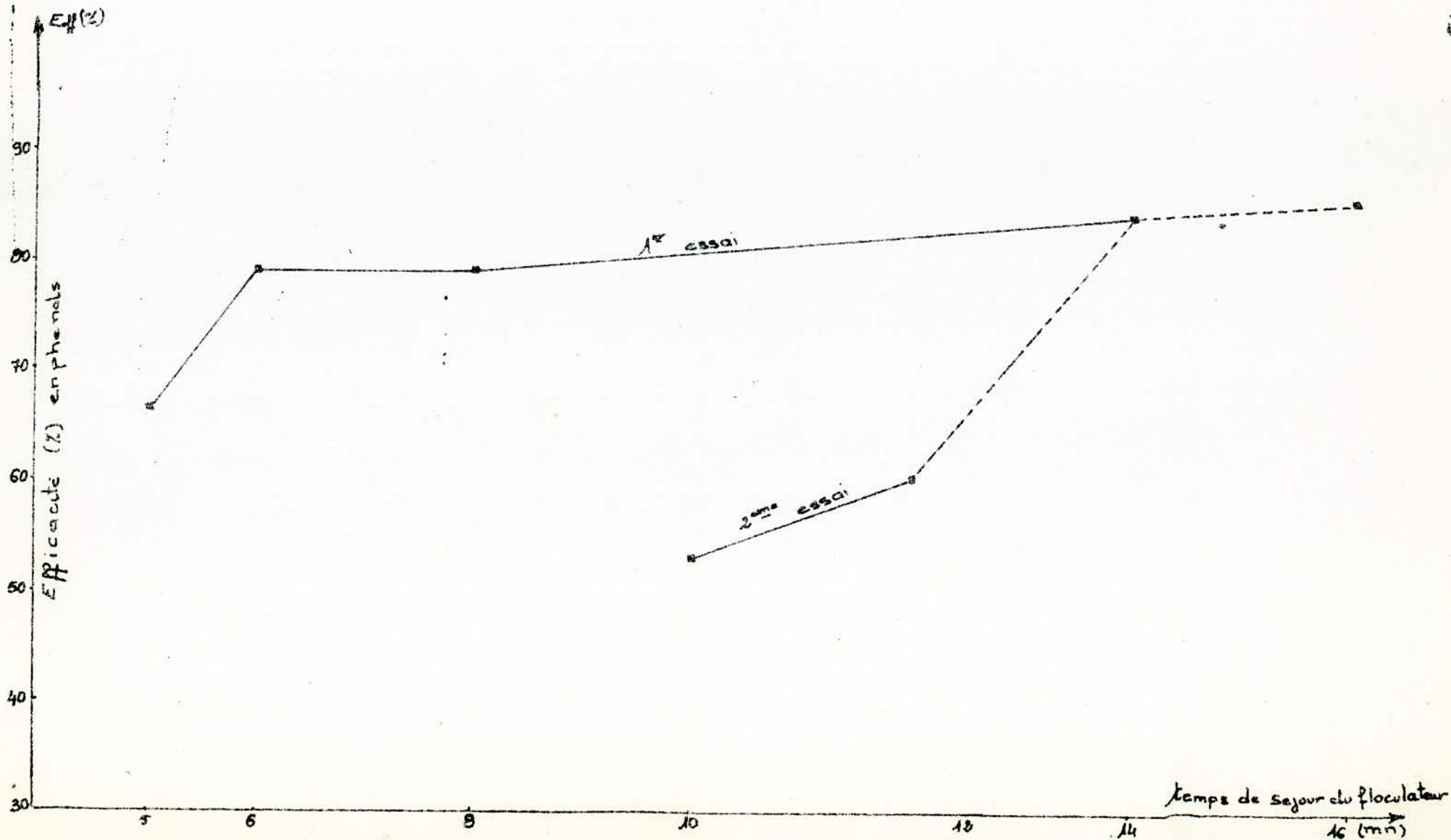


C.C en FeCl₃ p.p.m

C.C en $FeCl_3 = 75$ p.p.m

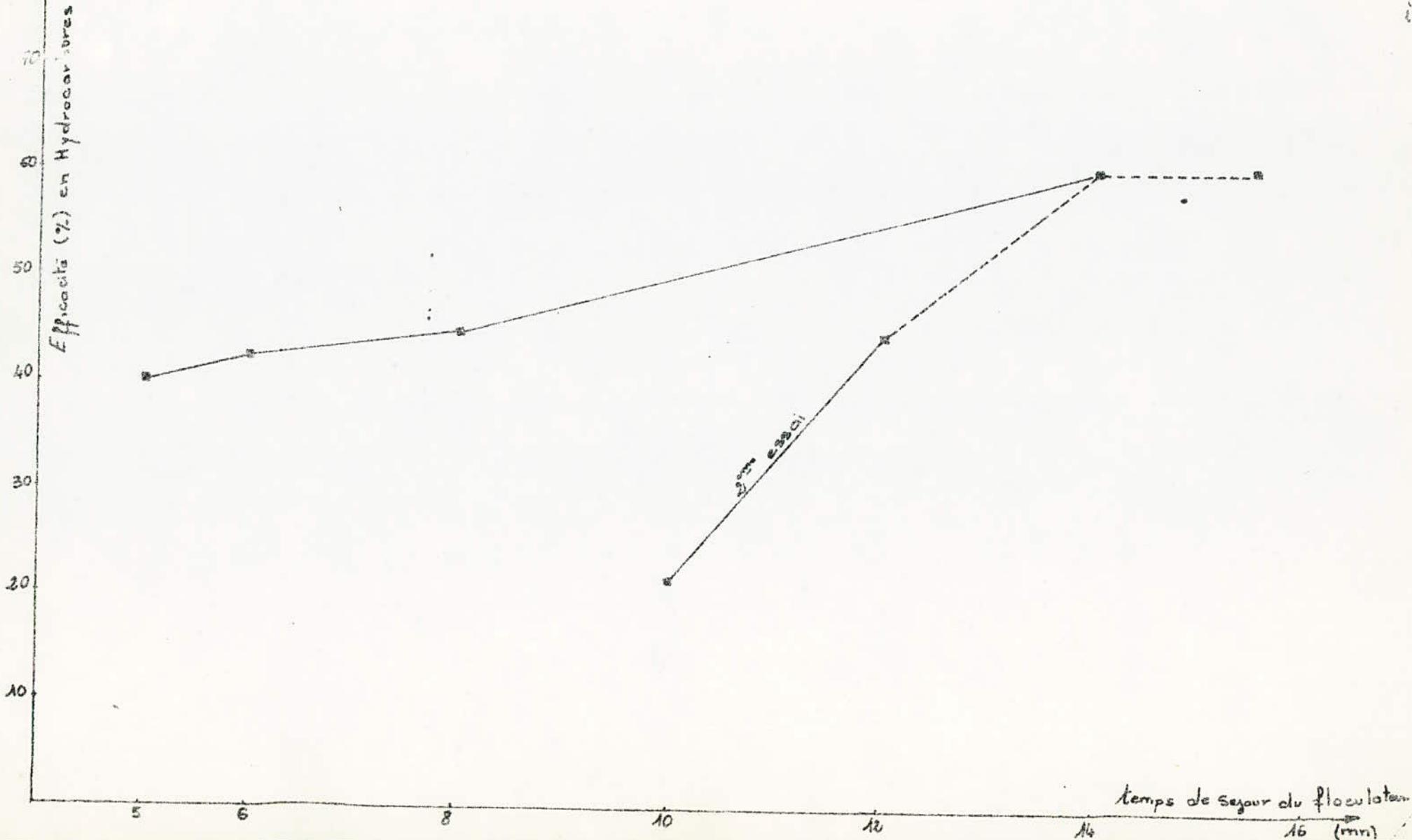
$$E_{ff}^{p} = f(t_f)$$

Courbe 4



Courbe 5

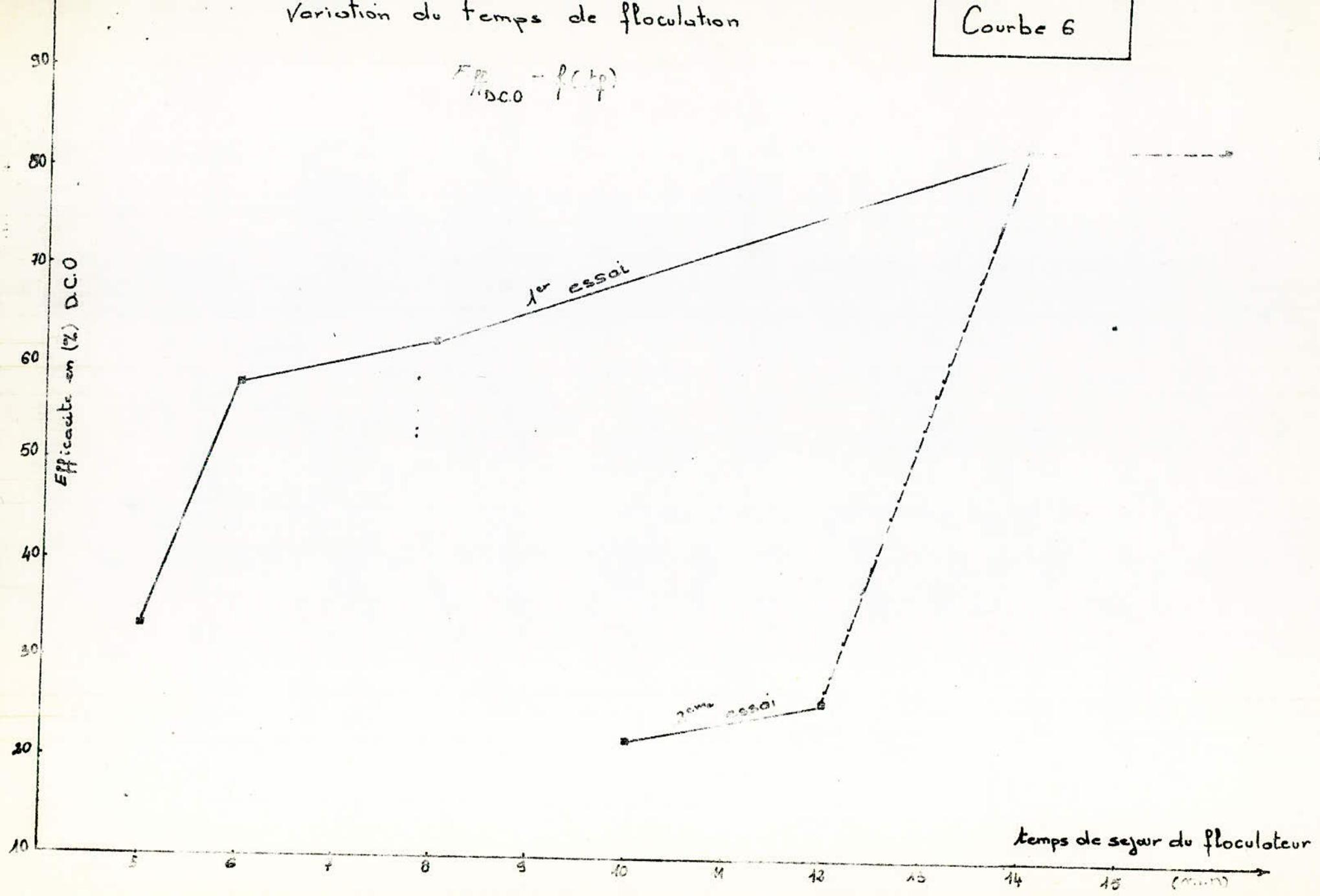
$$Eff_{H.C.} = f(t_f)$$



Variation du temps de floculation

Courbe 6

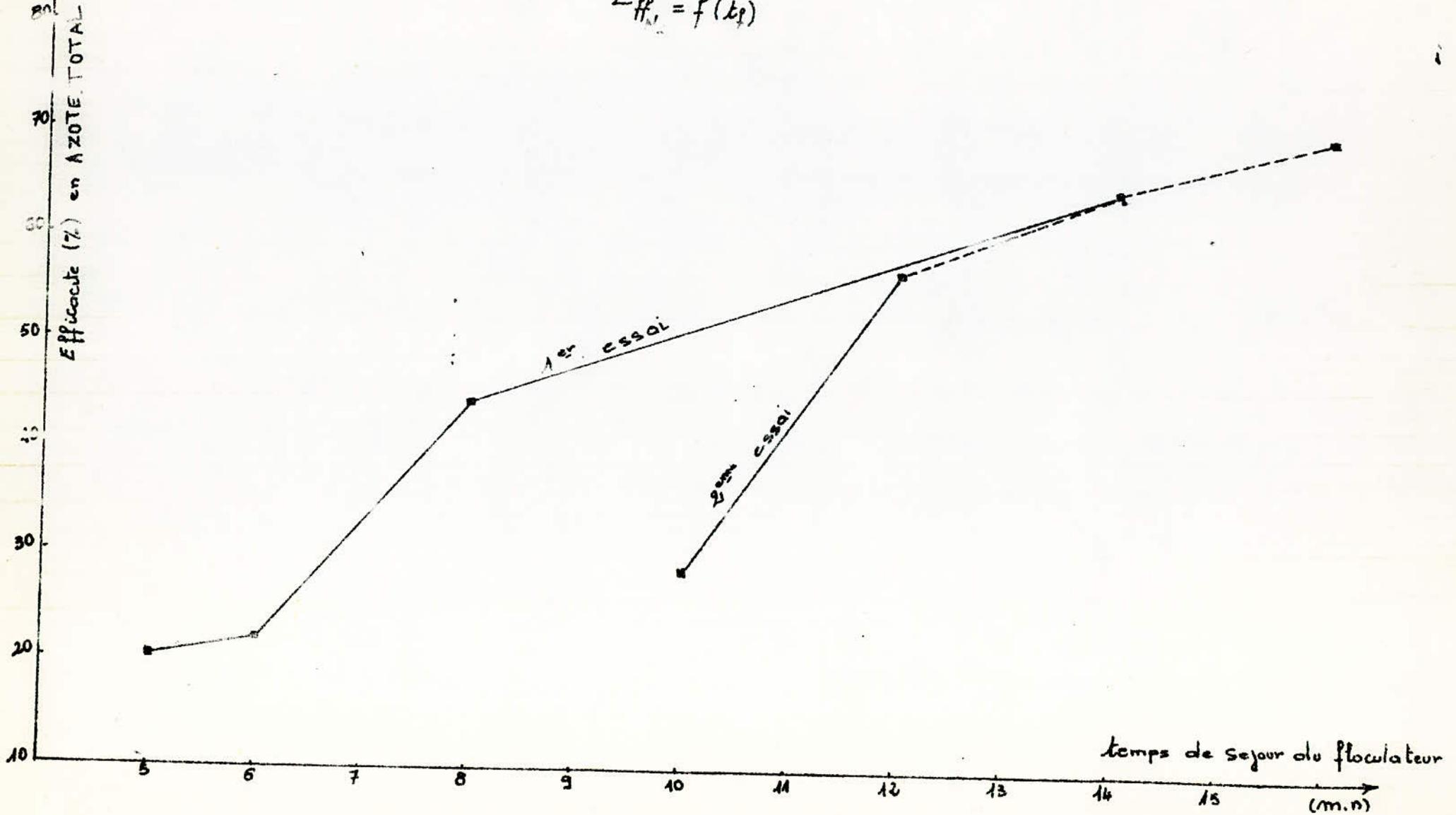
$$F_{\text{DCO}} = \frac{P(t_p)}{P}$$



Variation du temps de sejour du flocculateur

Courbe 7

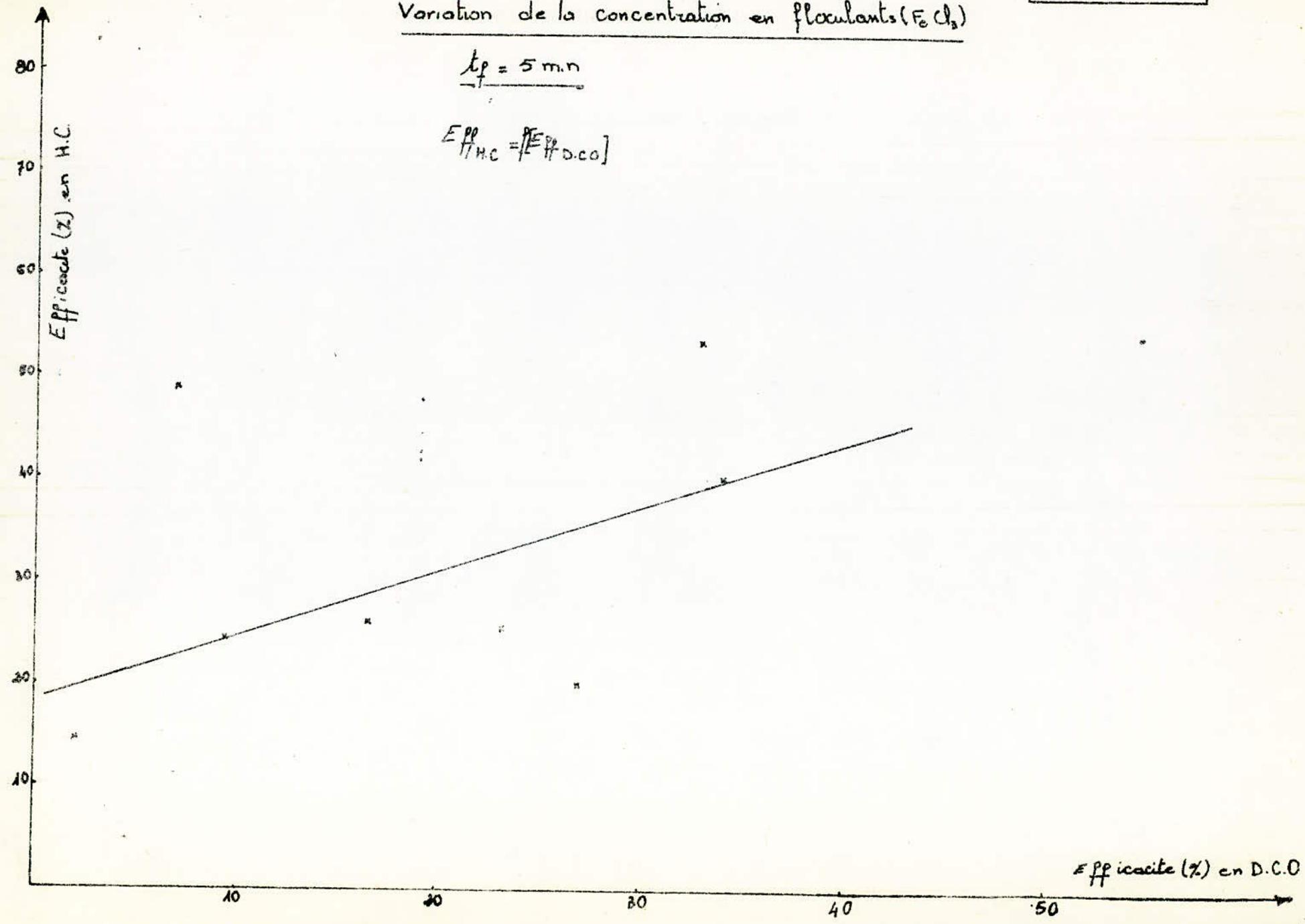
$$E_{ff_{N_2}} = f(t_f)$$



Variation de la concentration en flocculants ($FeCl_3$)

$t_p = 5 \text{ min}$

$E_{TMC}^{pp} = [E_{D.C.O}^{pp}]$



Courbe 3

Eff (Z) en H.C.

Concentration en $FeCl_3 = 75 \text{ p.p.m.}$

$$E_{H.C.} = f[E_{D.C.O.}]$$



Efficacite (Z) en D.C.O.

Courbe d'etalonnage Infra-Rouge

Courbe 10

