

65/3747

Agence Financière de Bassin Seine-Normandie

255.0  
88 EF

Série Recherche et Développement

INTERNATIONAL BOARD OF CONTROL  
FOR THE POTABLE WATER SUPPLY AND  
DISTRIBUTION (IBWSD)

# EFFICACITE DE LA FILTRATION SUR SABLE DE L'EAU POTABLE

Etude réalisée  
au

# CREATE

n° 2

év. 1988

5-7-9, Bd Louis  
92700 Colombes - tel 255.0-88EF-3747

# EFFICACITE DE LA FILTRATION

DANS LES PETITES UNITÉS D'EAU POTABLE

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE  
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY  
AND SANITATION (IWC)  
P.O. Box 2003, 2500 AD The Hague  
Tel. (070) 814311 ext. 141/142  
RN: bn 37.47  
LO: 255.0 88 EF

FEVRIER 1988

Etude réalisée au C.R.E.A.T.E.  
par M. Echavidre  
sous la responsabilité de  
Mme Berdou

Toute utilisation ou reproduction de ce rapport est interdite sans une autorisation  
préalable de l'agence financière de bassin "Seine-Normandie"

## S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION .....	1
CH I/ - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	2
I - THEORIE DE LA FILTRATION .....	2
I.1 Mécanismes de la filtration .....	2
I.1.1 Transport .....	2
I.1.2 Mécanisme de fixation .....	6
I.2 Modèle mathématique .....	10
I.2.1 Elimination des matières en suspension ....	11
I.2.2 Perte de charge .....	26
II - OPTIMISATION DE LA FILTRATION .....	35
CH II/ - ETUDE EXPERIMENTALE .....	40
I - AXES D'ETUDE .....	40
1. Paramètres à étudier .....	40
1.1 Qualité de l'eau .....	40
1.2 Perte de charge .....	40
II - PROTOCOLES EXPERIMENTAUX .....	44
1. Matériel et méthodes .....	44
CH III/ - INTERPRETATION .....	52
I - BILANS PAR STATION .....	52

	<u>Pages</u>
1. Station de LAGNY .....	52
2. Station de CHESSY .....	61
3. Station de ETAMPES .....	65
4. Station de ST-AUBIN .....	68
5. Station de DONVILLE .....	74
6. Station de GUEHEBERT .....	78
7. Station de NICORPS .....	82
II - SYNTHESE GENERALE .....	86
CONCLUSION .....	90
BIBLIOGRAPHIE .....	91
ANNEXES .....	93

# INTRODUCTION

---

L'objet de cette étude est d'évaluer l'efficacité de la filtration sur de petites unités de traitement d'eau potable.

La filtration est une étape fondamentale du traitement des eaux superficielles. Elle consiste à clarifier l'eau qui contient de petites particules en suspension. Ces particules sont généralement trop petites pour décanter, peuvent être vivantes (algues, oeufs, bactéries) ou mortes, organiques (humus, débris végétaux) ou minérales (précipités d'hydroxydes, silicates...)

L'étude qui suit est limitée aux filtres les plus souvent utilisés sur les petites stations :

- la filtration s'effectue à travers une substance poreuse constituée d'un lit de sable. Les matières en suspension sont retenues sur toute l'épaisseur du lit (filtration dans la masse),
- les vitesses de filtration sont de l'ordre de 3 à 15 m/h, et l'action de clarification est physique ou physico-chimique.

Quoique connue et dominée depuis de nombreuses années, l'étape de filtration est peut-être délaissée actuellement. Les nouvelles techniques d'évaluation de la qualité des eaux diminuent de plus en plus les seuils de mesure, et contribuent à forger un doute sur l'efficacité réelle de la filtration.

Après une synthèse bibliographique qui doit servir de base à la compréhension des phénomènes physiques de la filtration, l'étude se poursuit par la recherche des paramètres représentatifs de l'efficacité de la filtration. L'étude de ces paramètres permet dans un premier temps d'établir un protocole expérimental qui sera appliqué dans un second temps, sur le terrain.

Sept petites unités du Bassin "Seine-Normandie" ont été suivies: trois en région parisienne (Seine et Marne, Essonne) et quatre dans le département de la Manche.

Les résultats de l'étude et les bilans station par station font l'objet de la dernière partie de ce rapport.

# CH I/ - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## I - THÉORIE DE LA FILTRATION

Dans les petites unités de traitement d'eau potable, la filtration (ou filtration dans la masse) est un procédé physico-chimique, dont les caractéristiques de construction et d'exploitation sont facilement connues. Ces paramètres physiques permettent de comparer les résultats expérimentaux avec les récentes théories mathématiques sur la filtration. Pour comprendre les problèmes susceptibles d'apparaître au cours de cette étape de traitement, il est nécessaire d'assimiler et de synthétiser les connaissances bibliographiques sur ce sujet.

Le processus de filtration est modélisable sous forme mathématique. Mais la complexité des mouvements particules-fluide et la variabilité de la qualité de l'eau brute ne permettent pas de prédire complètement le fonctionnement du filtre. Par contre les études théoriques d'optimisation montrent quels sont les paramètres à suivre pour avoir une bonne efficacité de la filtration.

## I - Théorie de la filtration

### I.1 - Mécanisme de la filtration

L'enlèvement des particules de l'eau qui traverse le filtre obéit à deux mécanismes principaux : le transport et la fixation. (cf. (1), (2), (3), (4), (5)).

#### I.1.1 - Transport

Les mécanismes de transport déplacent une particule dans un pore du filtre de sorte qu'elle se rapproche de la surface d'un grain (ou de dépôts existants).

Les chemins d'écoulement fluide dans un lit filtrant sont trop complexes pour être analysés d'une manière géométrique précise.

Cependant l'état de l'écoulement peut être déterminé par le nombre de REYNOLDS ( $R = vd \frac{\rho}{\mu}$ ). Pour un filtre de granulométrie 0,5 mm, une vitesse de filtration de 15 m/h, et une température de l'eau de 20°C ( $\mu = 0,01$  Stokes), le nombre de Reynolds est peu différent de 2.

L'écoulement de l'eau peut donc être considéré comme laminaire (4), et il s'en suit un contact permanent entre le fluide et la surface des grains. La vitesse du fluide aux limites (surface des grains) est nulle et est maximale au centre du pore.

Pour qu'une particule en suspension puisse se déposer sur un grain, il faut qu'elle sorte d'une ligne de courant et atteigne la surface du grain. Ceci n'est possible que grâce aux forces fournies par les mécanismes de transport. En filtration, différentes forces interviennent, toutes liées à la taille et à la densité de la particule.

### Modes de transport

#### - Transport par diffusion

Les particules les plus fines sont soumises à des mouvements irréguliers dus à l'énergie thermique des molécules qui les entourent. IVES (1) cite les travaux de divers chercheurs et aboutit à la conclusion que la diffusion n'intervient que pour les particules de diamètre inférieur à un micron.

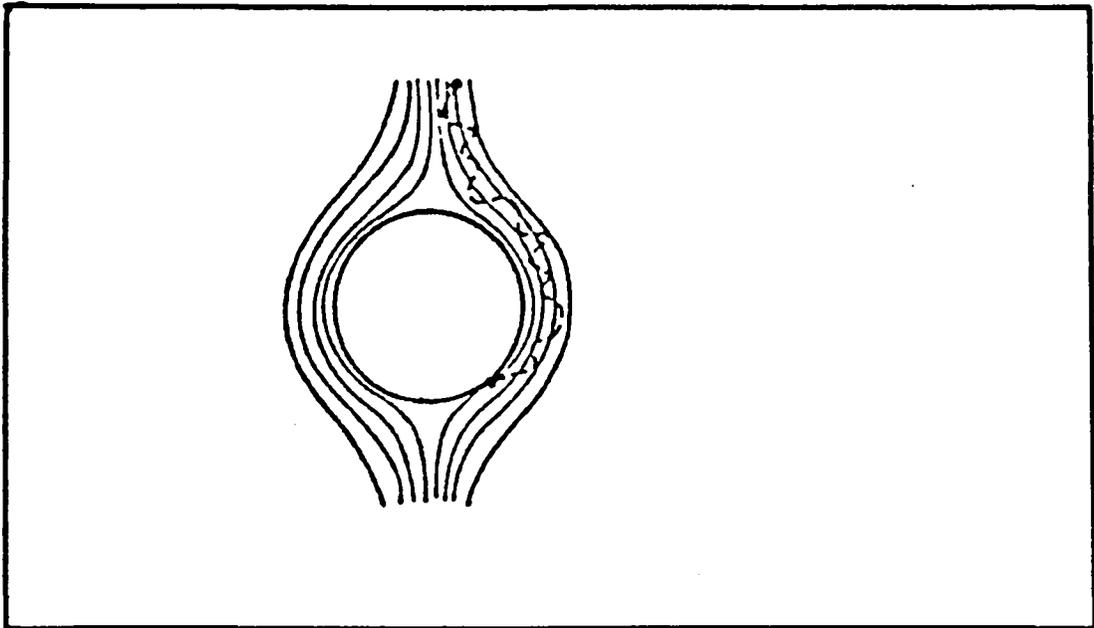


Fig. 1. Transport par diffusion d'après IVES (4).

- Décantation

Les particules en suspension sont affectées d'une façon significative par la gravité. Elles se déplacent dans la direction de la pesanteur avec une vitesse de décantation (Stokes) qui leur fera traverser les lignes de courant et venir au contact des grains au niveau des faces supérieures.

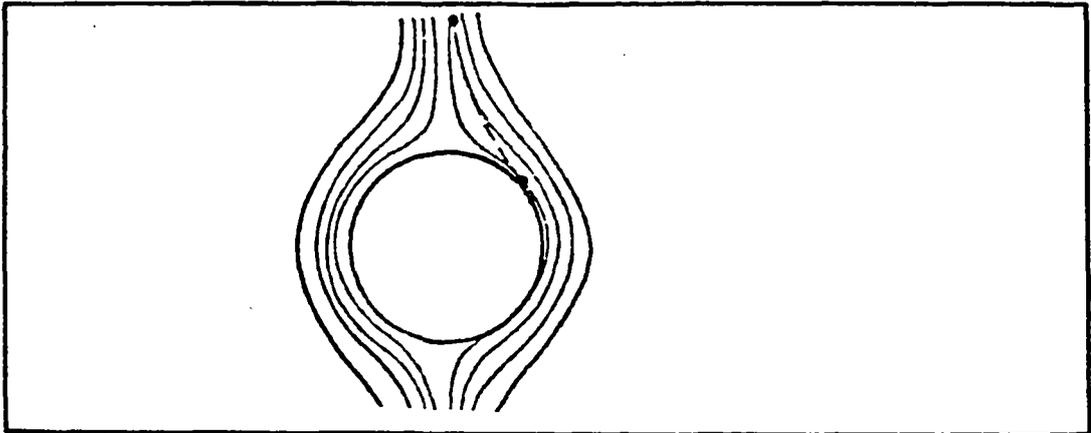


Fig. 2. Transport par décantation (4).

- Inertie

Les particules denses emportées par l'eau avec une certaine vitesse peuvent tendre à voyager en ligne droite même lorsque les lignes de courant s'incurvent autour des grains. Mais en raison de la viscosité élevée de l'eau, l'inertie est négligeable pour les particules en suspension.

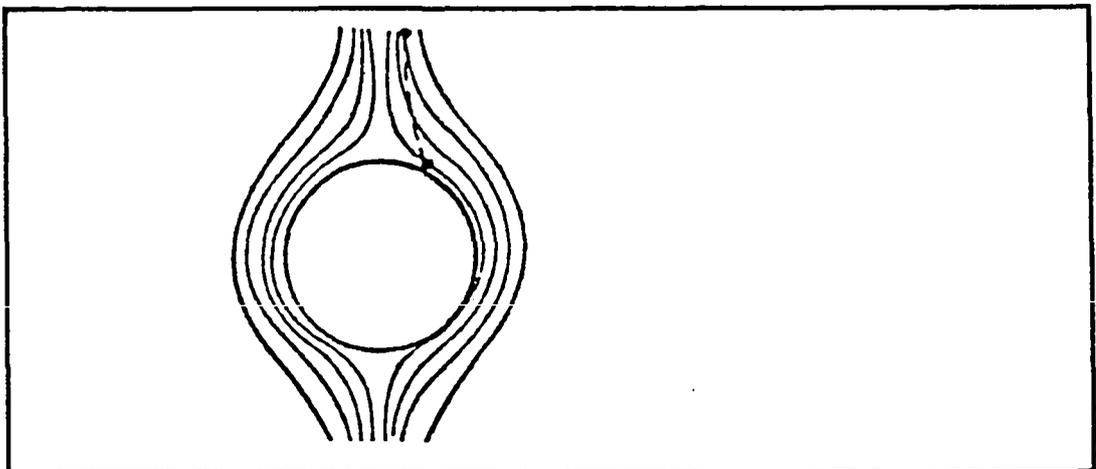


Fig. 3. Inertie (4).

Par exemple IVES (1) a montré que le rendement de l'enlèvement d'une particule de silice de  $60 \mu\text{m}$  de diamètre et de  $2,6 \text{ g/cm}^3$  de densité est inférieur à 1 %.

### - Hydrodynamique

Dans un écoulement laminaire, les particules sont soumises à un champ uniforme de cisaillement (champ créé par la différence de vitesse du fluide entre deux lignes de courant) qui crée une force latérale perpendiculaire aux lignes de courant. Cette force tend à les faire dériver vers les zones mortes d'écoulement situées à la surface des grains. Ce phénomène est d'autant plus accentué que les particules sont anguleuses, comme l'illustre la fig. 4.

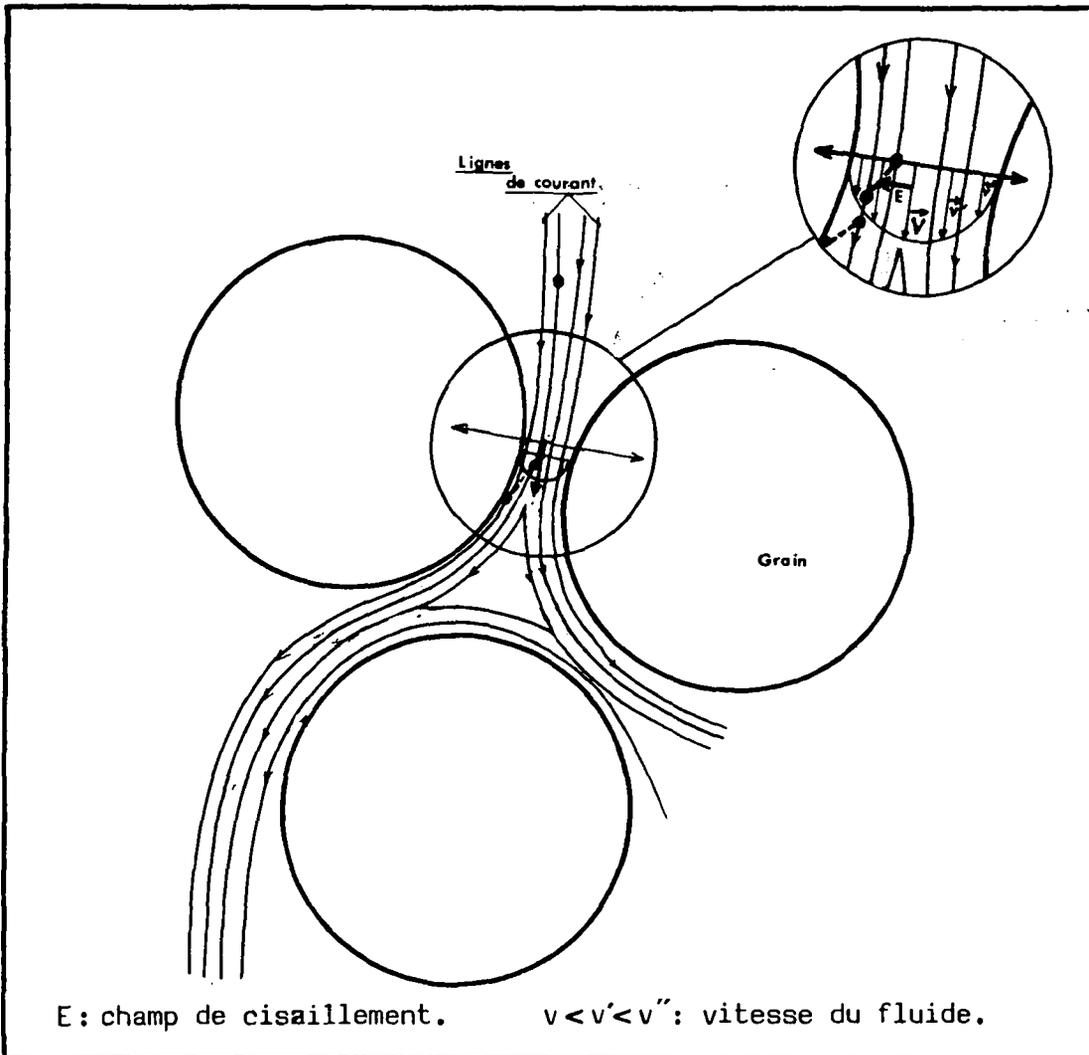


Fig. 4. Transport par hydrodynamisme.

### - Effets combinés

Les différents mécanismes de transport peuvent agir simultanément sur une particule.

En général, pour les suspensions de taille inférieure à  $1 \mu\text{m}$  la diffusion est prépondérante. Les particules de plus de  $10 \mu\text{m}$  et plus denses que l'eau subissent le phénomène de **décantation**. Toutes les particules sont soumises aux forces hydrodynamiques (dérive).

#### I.1.2 - Fixation

En surface, le filtre se comporte comme une membrane, et retient les particules par **tamissage**. Les suspensions de diamètre supérieur à celui des pores sont ainsi enlevées du fluide. Une faible quantité des matières en suspension doit être éliminée de cette façon, sinon la granulométrie du filtre n'est pas appropriée. Les particules sont en grande majorité retenues dans les profondeurs du filtre. Leur fixation à la surface des grains (ou des dépôts existants) est attribuée dans la littérature à des forces physico-chimiques et moléculaires (1), et au phénomène d'interception.

### - Interception

Certaines particules soumises aux mécanismes de transport se rapprochent des lignes de courant à la limite de la surface des grains, et peuvent être enlevées par **interception** (cf. fig. 5). L'effet intercepteur est indépendant de la masse ou de la densité de la particule, mais dépend de sa taille.

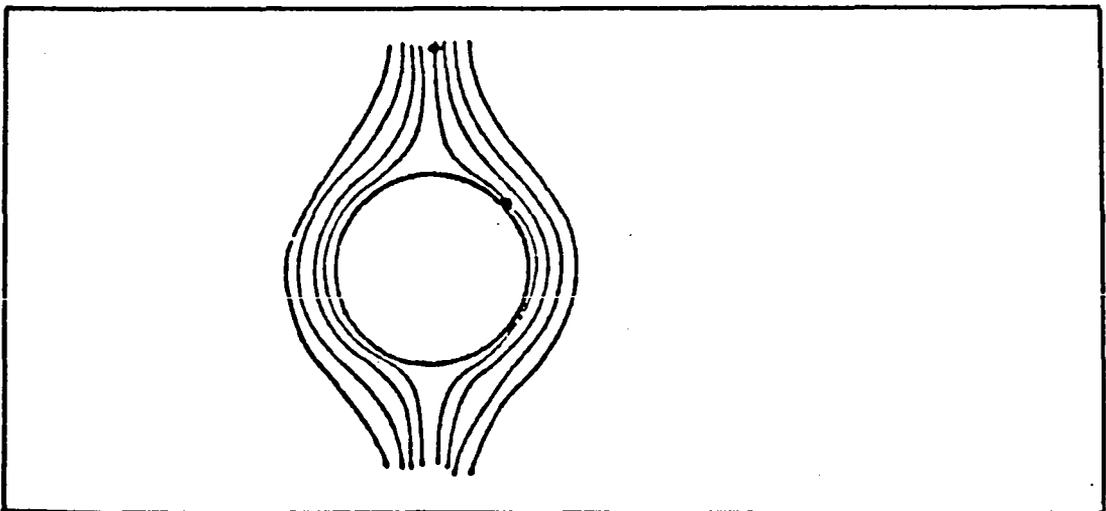


Fig. 5. Interception (4).

- Les **forces moléculaires** (ou de London-Van der Waalls) agissent à de très faibles distances (moins de  $0,5 \mu\text{m}$ ) du grain et provoquent la fixation des particules. Les mécanismes de transport précités sont essentiels. Ils augmentent les occasions d'adhésion en rapprochant les particules de la surface des grains.

En général, les particules en suspension dans l'eau possèdent un potentiel électrique négatif (potentiel zéta), comme les grains de sable ( $- 25$  millivolts). Pour que la fixation s'effectue, il faut que la force électrostatique de répulsion de la couche superficielle du grain soit brisée. Les mécanismes de transport peuvent le réaliser. (voir fig. 6)

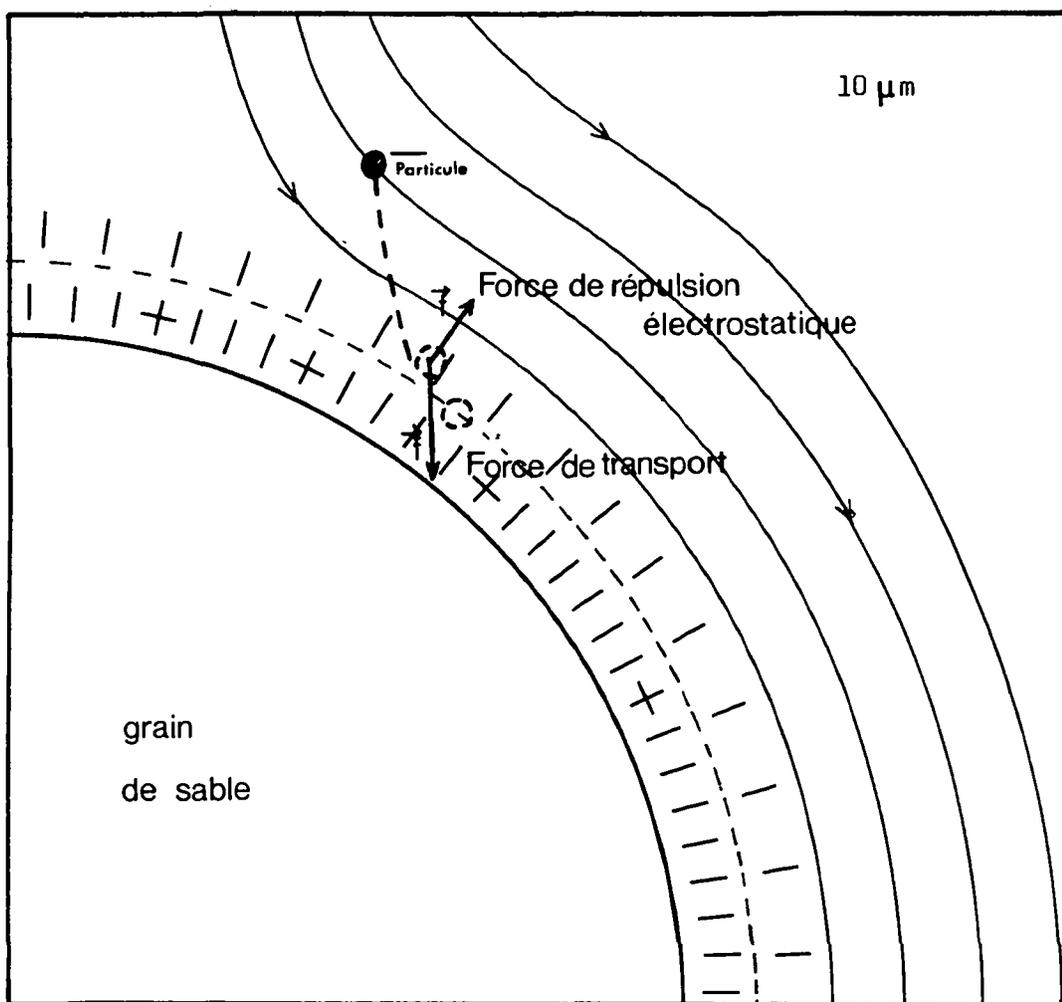


Fig. 6. Diagramme de fixation des particules de charges négatives

### - Forces physico-chimiques

Il est possible d'augmenter l'efficacité de la fixation en recouvrant la surface stationnaire des grains par des polymères ioniques. Mais même si les grains et les particules ont des potentiels différents, une fois qu'une couche de particule existe à la surface des grains, il se crée une situation de potentiels semblables. Cependant l'adjonction de polymères est tout de même bénéfique puisque le dépôt sur le grain diminue la porosité du lit de sable et accroît la probabilité d'interception des particules.

Les particules sont souvent attachées par des ponts moléculaires (polymères naturels ou hydroxydes) qui sont adsorbés à une extrémité sur la particule et à l'autre sur la surface du grain. Pour que ces ponts moléculaires s'établissent, il faut que les polymères soient chargés positivement. En traitement des eaux, les polymères les plus souvent rencontrés sont les précipités d'hydroxyde d'aluminium. Dans ce cas là, le pH de l'eau est très important. La fig. 7. montre que la diminution du potentiel zéta des micelles d'hydroxyde d'aluminium est très rapide aux pH supérieurs à 7,2.

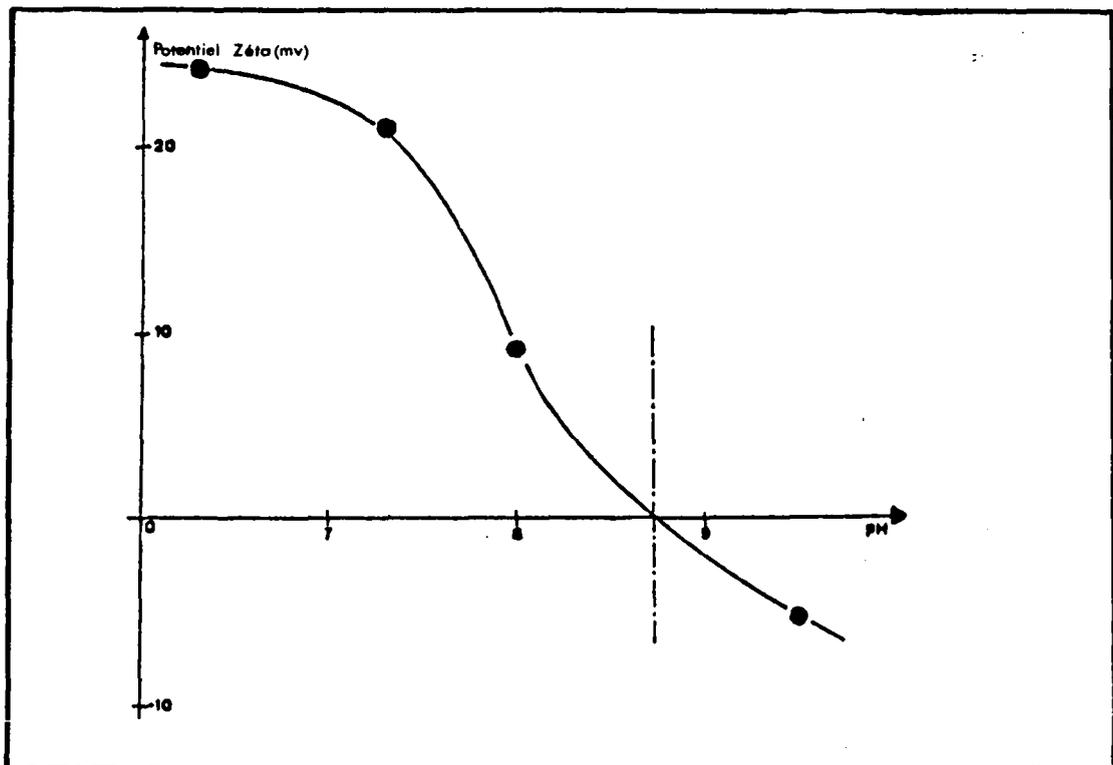


Fig. 7. Evolution du potentiel zéta de l'hydroxyde d'aluminium dans l'eau distillée en fonction du pH (d'après M. CLEMENT, R. SEUX et B. MOUSSA (5)).

Pour aller dans le sens d'une augmentation de la fixation des particules colloïdales aux grains de sable par l'intermédiaire des hydroxydes, il faut donc que l'eau soit à un pH acide.

La fig. 8. précise la zone de pH pour que la clarification soit optimale dans le cas de l'eau de la Loire: il apparaît que pour un pH de 6,4 environ, l'oxydabilité et la turbidité de l'eau décantée sont minimales. A ce même pH, le potentiel zéta des colloïdes résiduels s'annule, tandis que celui de l'hydroxyde d'aluminium est élevé (+ 25 millivolts). L'hydroxyde peut donc jouer efficacement son rôle de pont moléculaire entre le grain de sable et le colloïde (à un pH de 6,4, le potentiel zéta du grain de sable est d'environ - 28 millivolts (3)).

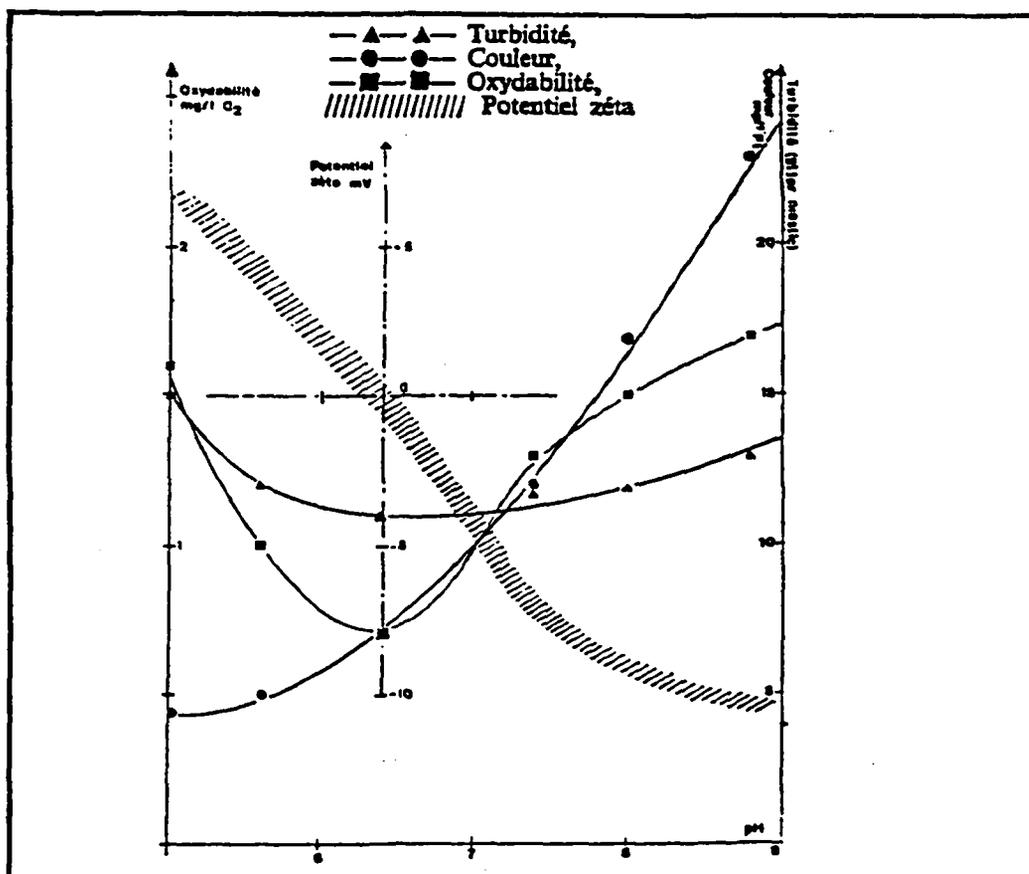


Fig. 8. Variation des différents paramètres de l'eau de la Loire traitée en fonction du pH (d'après M. CLEMENT, R. SEUX et B. MOUSSA (5)).

D'après MASSCHELEIN (3), les mécanismes électrostatiques expliquent la mauvaise efficacité d'un filtre propre. En effet, juste après un lavage, les grains de sable sont chargés négativement et repoussent les particules colloïdales chargées de même signe.

Par contre si le prétraitement est correctement mené, l'eau décantée arrive sur le filtre avec des floccs d'hydroxyde de fer ou d'aluminium, chargés positivement (à un pH  $\simeq$  7,2). Le flocc se dépose peu à peu sur les grains et tend à inverser leur potentiel zéta. Les particules colloïdales rencontrent alors beaucoup plus de sites chargés positivement et l'adhérence en est facilitée. Il est possible de limiter cet effet nuisible pour la qualité des eaux filtrées, par un préconditionnement approprié du sable au moyen d'adjuvants de coagulation telle la silice activée (3).

L'étude des mécanismes de la filtration amène une principale remarque : l'efficacité de la filtration est limitée par deux paramètres :

- le nombre des particules transportées à proximité de la surface d'un grain,
- le nombre de particules qui se fixent sur le grain.

En pratique, il est possible d'améliorer le transport utile des particules, c'est-à-dire d'augmenter le nombre de collisions entre les matières en suspension par une **coagulation** appropriée. De même, la fixation est facilitée par l'ajustement de variables chimiques telles que le pH, la composition ionique de l'eau, la nature et la dose des polymères de **floculation**. Les **prétraitements** sont donc primordiaux pour améliorer l'efficacité de la filtration.

## I.2 - Modèles mathématiques

La théorie ne peut remplacer l'expérimentation. Elle indique simplement que certains paramètres physiques doivent être surveillés dans la quête d'une meilleure efficacité. Divers modèles mathématiques de filtration ont été proposés par des chercheurs (cf. (1), (2), (3), (4)) depuis de nombreuses années. Les modèles mathématiques sont de deux types :

- ceux relatifs à la clarification de la suspension ;
- ceux consécutifs au colmatage du filtre (perte de charge).

### 1.2.1 - Elimination des matières en suspension

D'après IWASAKI (12), la quantité de suspensions enlevées par unité de profondeur du filtre est proportionnelle à la concentration locale.

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \lambda C$$

où :

- C : concentration locale de la suspension (mg/l).
- L : profondeur du filtre (m).
- $\lambda$  : coefficient de filtre ( $m^{-1}$ ).

En d'autres termes, la réduction de concentration avec la profondeur du filtre est logarithmique si le filtre et les particules en suspension sont uniformes (filtre propre et débit constant).

$$\text{Log } \frac{C}{C_0} = - \lambda_0 L \quad (\text{cf. fig. 9})$$

où :

- $C_0$  : concentration de la suspension à l'entrée du filtre.
- $\lambda_0$  : coefficient du filtre propre.

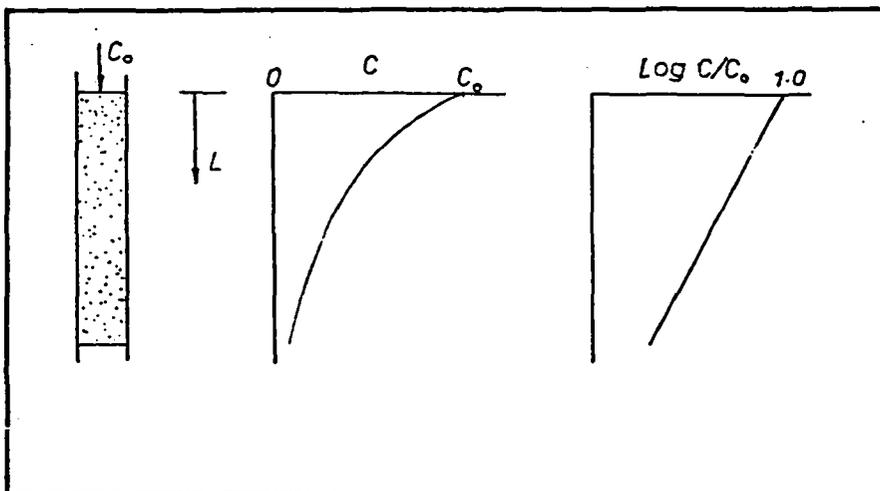


Fig. 9. Diminution logarithmique de la concentration C avec la distance L dans un filtre uniforme (d'après IVES (4)).

Une conséquence immédiate de cette diminution logarithmique de la concentration est que les couches les plus éloignées de la surface retiennent moins de matière. En effet en milieu uniforme, chaque couche retient la même proportion des matières en suspension qui la traversent. Mais comme la concentration diminue de couche en couche, les couches inférieures éliminent une quantité plus faible. Pour que le filtre travaille plus efficacement en profondeur, il faudrait que chaque nouvelle couche à traverser, retienne plus de matières que la précédente. Ceci se produirait si la granulométrie du lit de sable était de plus en plus fine. Malheureusement, en pratique il arrive l'inverse. Les lavages mettent en expansion le lit de sable; à l'arrêt du lavage, les grains les plus denses migrent en profondeur et les plus légers restent en surface, créant ainsi une stratification néfaste pour un enlèvement proportionnel des particules, comme le montre la fig. 10.

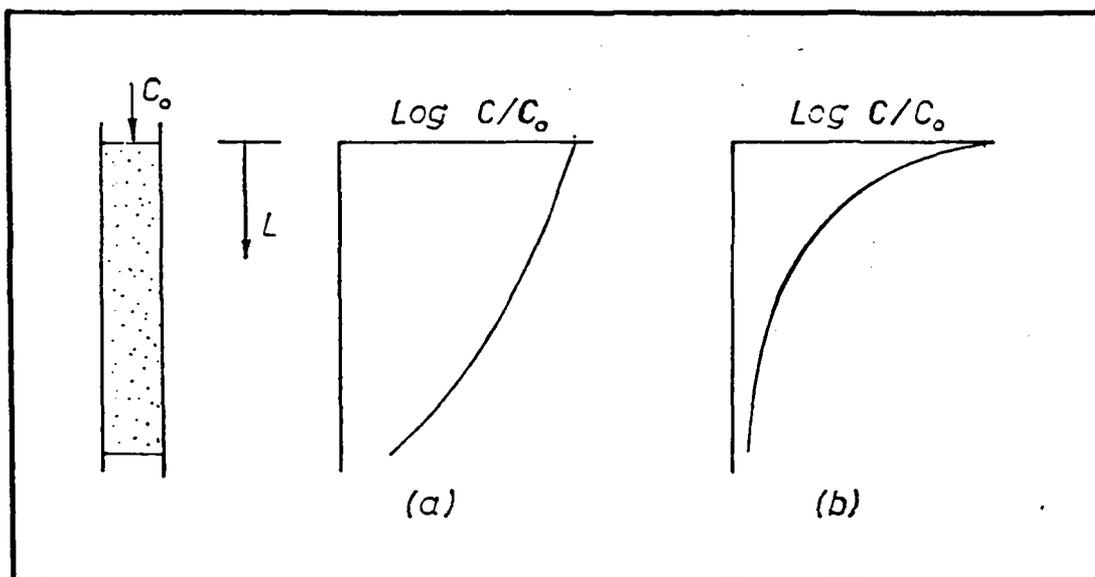


Fig. 10. Variations de la concentration  $C$  avec la distance  $L$  dans les filtres non uniformes.

- (a) Rendement de l'enlèvement augmentant avec  $L$  (granulométrie de plus en plus fine)
- (b) Rendement diminuant avec  $L$  (granulométrie de plus en plus élevée)

(d'après IVES (4)).

Pour atteindre la courbe optimale de la fig. 10. (a) où chaque couche successive est plus efficace, il est nécessaire d'examiner les facteurs qui conditionnent le rendement du filtre.

Modéliser l'étape de filtration n'est pas si facile, de nombreux paramètres varient, ce qui limite le rapprochement des courbes théoriques et expérimentales. Essayons de dégager l'ensemble des facteurs qui interviennent dans le processus de clarification. Deux systèmes apparaissent :

- le fluide
- le lit filtrant.

Le fluide varie à travers des caractéristiques hydrauliques (débit), physiques (viscosité de l'eau liée à la température, matières en suspension), chimiques (pH). Le lit filtrant se caractérise par la profondeur, la granulométrie et la porosité du sable.

Pour faciliter l'expression théorique de la clarification, il convient d'émettre certaines hypothèses :

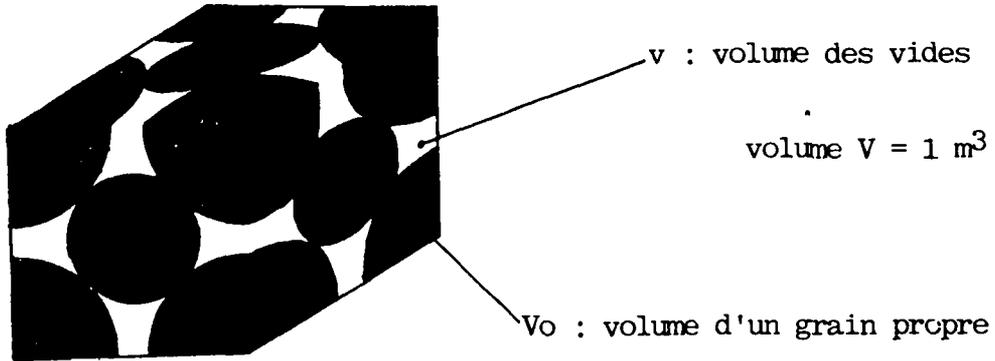
- Les caractéristiques de la suspension sont fixées avant qu'elle ne pénètre dans les pores du filtre (concentration constante).
- Les forces de répulsion électrostatique n'interviennent pas (pH, température et force ionique constants).
- La vitesse de filtration est constante (débit constant). Dans ces conditions, le rendement du filtre est uniquement lié à deux paramètres physiques :  
la surface de dépôt offerte aux particules et la vitesse de filtration.

Modèle de la surface spécifique générale et de la vitesse interstitielle (aspect macroscopique) (d'après (4), (6), (7)).  
Au début du cycle de filtration, les grains de sable offrent des surfaces "sphériques" pour le dépôt des matières en suspension. A ce stade du raisonnement, il faut introduire une notion très importante en filtration, la porosité.

D'après G. DE MARSILY (16), la porosité d'un milieu poreux représente le rapport du volume des vides au volume total pour un volume donné de matière.

La difficulté réside dans la détermination de ce volume de référence. Il est évident que la porosité d'un grain de sable n'a pas de signification hydrogéologique.

Prenons comme volume de référence dans un filtre,  $1 \text{ m}^3$ .



La porosité  $\epsilon_o = \frac{v}{V}$

Le volume des pleins représente  $V-v = 1 - \epsilon_o$  en  $\text{m}^3$

Le nombre de grains par unité de volume du filtre ( $1 \text{ m}^3$ ) est donc :

$$n = \frac{\text{volume des pleins}}{\text{volume d'un grain}} = \frac{1 - \epsilon_o}{V_o}$$

Soit  $\sigma$ : volume du dépôt par unité de volume du filtre.

Pour connaître le volume du dépôt sur un grain, il faut connaître la fraction d'unité de volume (vide compris),  $x$ , occupée par un grain dans  $1 \text{ m}^3$  de filtre.

$$x \cdot \text{nombre de grains/m}^3 = V = 1 \text{ m}^3$$

$$\text{d'où } x = \frac{1}{\frac{1 - \epsilon_o}{V_o}} = \frac{V_o}{1 - \epsilon_o}$$

Le volume du dépôt par grain est donc :

$$\sigma \frac{V_o}{1 - \epsilon_o}$$

Le volume du grain enrobé est donc :

$$V_\sigma = V_o + \sigma \frac{V_o}{1 - \epsilon_o}$$

$$V_\sigma = V_o \left( 1 + \frac{\sigma}{1 - \epsilon_o} \right)$$

$V_\sigma$  : volume du grain enrobé

Par hypothèse de départ, les grains sont sphériques,

$$\frac{S_\sigma}{S_o} = \left( \frac{V_\sigma}{V_o} \right)^{2/3} = \left( 1 + \frac{\sigma}{1 - \epsilon_o} \right)^{2/3}$$

avec  $S$  : surface du grain enrobé

$S_o$  : surface du grain propre

La surface des grains contenant du dépôt par unité de volume du filtre est donc :

$$S_\sigma = S_o \left( 1 + \frac{\sigma}{1 - \epsilon_o} \right)^{2/3}$$

Au fur et à mesure du dépôt des particules, les pores se colmatent de plus en plus, et les surfaces offertes au fluide ne sont plus que des canaux, comme le montre la fig. 11.

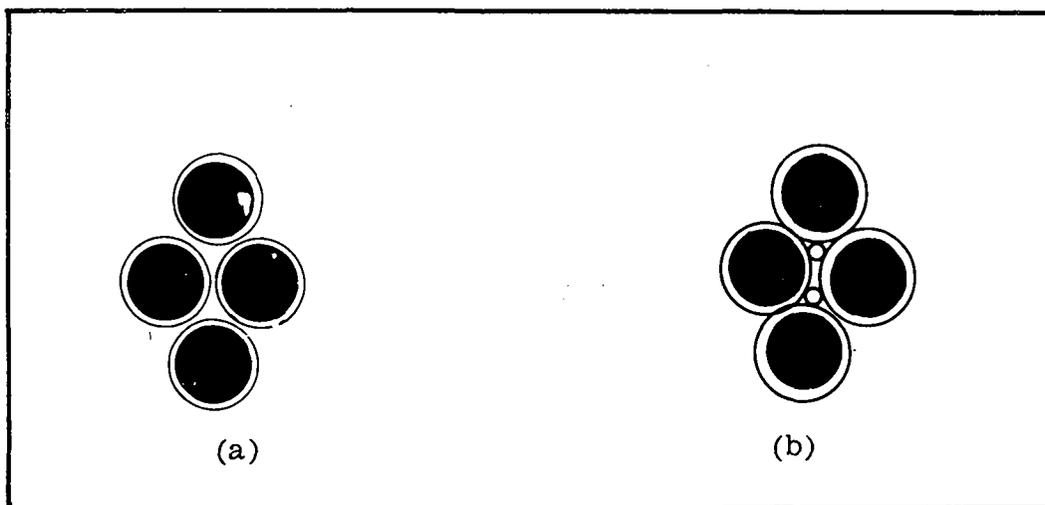


Fig. 11. Schémas illustrant l'évolution du colmatage au cours du temps

(a) colmatage sur surface sphérique.

(b) colmatage de capillaires.

Recherchons la surface de dépôt à l'intérieur d'un capillaire (approximation).

Soient  $N$  capillaires par surface unitaire, de longueur  $l$  par unité de profondeur, de rayon interne  $r$ .

La porosité initiale  $\epsilon_0 = \pi r^2 Nl$

La surface spécifique initiale  $S_0 = 2 \pi r Nl$

Soit  $\theta$  l'épaisseur du dépôt à l'intérieur du capillaire :

$$\text{alors } \sigma = \pi r^2 Nl - \pi (r - \theta)^2 Nl$$

$$\sigma = 2 \pi Nl r \theta - \pi Nl \theta^2$$

Soit à résoudre :

$$-\pi Nl \theta^2 + 2 \pi Nl r \theta - \sigma = 0$$

Equation du second degré en  $\theta$ , de solutions :

$$\theta_1 = r \left( 1 + \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \right)$$

$$\theta_2 = r \left( 1 - \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \right)$$

Seule  $\theta_2$  est solution possible car  $\theta$  doit être inférieur à  $r$  (l'épaisseur du dépôt ne peut être supérieure au rayon du capillaire).

$$\text{d'où } \theta = r \left( 1 - \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \right)$$

or  $S = 2 \pi (r - \theta) Nl$

$S$  = surface du grain enrobé

$$S = S_0 \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2}$$

L'expression de la surface colmatée offerte à l'écoulement devient alors :

$$S = S_\sigma \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2}$$

Soit  $S = S_0 \left( 1 + \frac{\sigma}{1-\epsilon_0} \right)^{2/3} \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^{1/2}$

Mais la géométrie des pores n'est pas la géométrie idéale admise (grain sphérique et capillaire droit). De sorte que l'on généralise les exposants :

$$S = S_0 \left( 1 + \frac{\sigma}{1-\epsilon_0} \right)^y \left( 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right)^z$$

La surface limite est atteinte pour  $S = 0$  (pores complètement colmatés), c'est-à-dire  $\sigma = \epsilon_0$ . En pratique ce n'est pas le cas, on observe une limite de l'élimination de la suspension avant que les pores ne soient complètement bouchés. En effet, pour une vitesse de filtration constante (hypothèse de départ), plus les pores se colmatent, plus la vitesse interstitielle augmente. IVES ((4), (9)) admet que le coefficient de filtre  $A$  est une fonction inverse de la vitesse interstitielle.

Il suppose de plus que,  $\lambda$  est proportionnel à une puissance  $\alpha$ , à la différence des inverses de la vitesse interstitielle et de la vitesse critique.

$$\lambda \approx \left( \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_c} \right)^\alpha$$

avec  $v_i$  : vitesse interstitielle (cf. annexe 1)

$v_c$  : vitesse critique (au-delà de laquelle les particules ne se déposent plus, mais il y a érosion du filtre).

$$v_c = \frac{V}{\epsilon_0 - \sigma_u} \quad V : \text{vitesse de filtration}$$

avec  $\sigma_u$  : dépôt ultime (caractéristique constante du filtre).

$$\text{alors } \lambda \approx \left( \frac{\epsilon_0 - \sigma}{V} - \frac{\epsilon_0 - \sigma_u}{V} \right)^\alpha$$

$$\lambda \approx \left( \frac{\sigma_u - \sigma}{V} \right)^\alpha$$

$$\text{où } \lambda \approx \left( \frac{\sigma_u}{V} \right)^\alpha \left( 1 - \frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^\alpha$$

à l'état initial,  $\lambda_0 = \lambda$  quand  $\sigma = 0$

$$\text{d'où } \lambda_0 \approx \left( \frac{\sigma_u}{V} \right)^\alpha$$

$$\lambda \approx \lambda_0 \left( 1 - \frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^\alpha$$

développement semblable à celui de MAROUDAS ((5), (9)).

IVES ((4), (9)) admet que le rendement de l'étape de filtration est une fonction simultanée de la surface spécifique (ou surface sphérique)  $S$  et de la vitesse interstitielle  $v_i$  :

$$\lambda = f(S, v_i)$$

Le modèle à surface spécifique combiné nous donnait :

$$\lambda = k \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \varepsilon_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^z$$

à l'instant  $t = 0$ ,  $\lambda = \lambda_0$  et  $\sigma = 0$

d'où  $\lambda_0 = k$

$$\text{d'où } \lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \varepsilon_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^z$$

l'expérience montrait que  $\lambda = 0$  pour  $\sigma \neq 0$ , c'est-à-dire, lorsque  $\sigma = \sigma_u$ , et  $v_i = v_c$ .

Cette équation générale sert de modèle à de nombreux autres chercheurs :

. IVES ((4), (9))

si  $y = z = x = 1$  l'équation générale est la même que l'équation originelle d'IVES (18)

$$\lambda = \lambda_0 + a\sigma - \frac{b\sigma^2}{(\varepsilon_0 - \sigma)}$$

. MACKRLE ((4), (9))

si  $x = 0$ , l'équation se réduit à celle de Mackrle

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \varepsilon_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^z$$

. LERK (4), HERZIG (9), SHEKTMAN (4)

si  $y = x = 0$  et  $z = 1$ , l'équation correspond aux théories de Lerk, Shekتمان et Herzig :

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)$$

. MAROUDAS ((4), (9))

si  $y = z = 0$  et  $x = 1$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = (1 - \frac{\sigma}{\sigma_0})$$

. IWASAKI (9)  $y = 1$  et  $z = x = 0$

$$\lambda = \lambda_0 + a\sigma \quad a > 0$$

. MINTS (4) admettait un autre modèle, fondé sur le processus de dépôt et érosion :

$$- \frac{\partial C}{\partial L} = \lambda_0 C - \frac{\alpha \sigma}{v}$$

dans laquelle :  $-\lambda_0 C$  représente le dépôt des particules

$-\frac{\alpha \sigma}{v}$  représente l'érosion des dépôts  
( $\alpha$  : coefficient d'érosion)

$-C$  représente la concentration locale de la suspension (en mg/l)

$-L$  représente la profondeur du filtre (en m)

Tenant compte de l'observation de Mints que pour l'eau claire traversant un filtre colmaté, on n'observe pas d'érosion, le coefficient d'érosion est dépendant de la concentration.

Soit  $\alpha = \alpha' C$

alors 
$$- \frac{\partial C}{\partial L} = \lambda_0 C - \frac{\alpha'}{v} C \sigma$$

$$= \lambda_0 (1 - \frac{\alpha'}{v \lambda_0} \sigma) C$$

soit 
$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = (1 - \frac{\alpha'}{v \lambda_0} \sigma)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = (1 - \frac{\sigma}{\sigma_0})$$

Ce qui est l'équation générale quand  $y = z = 0$  et  $x = 1$ . Cela ne détruit pas l'hypothèse de base du modèle de Mints, qui admet que le mécanisme de la filtration comprend dépôt et érosion.

Le seul inconvénient de cette équation générale

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \varepsilon_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^z \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma u}\right)^x$$

et de toutes celles qui en découlent, est qu'elle repose sur une hypothèse incomplète. Le rendement de la clarification par filtration ne peut être une fonction inverse de la vitesse de filtration pendant toute la durée du cycle.

En effet il apparaît en pratique, que l'efficacité de la filtration évolue suivant la fig. 12., alors que au fur et à mesure du colmatage, la vitesse interstitielle augmente.

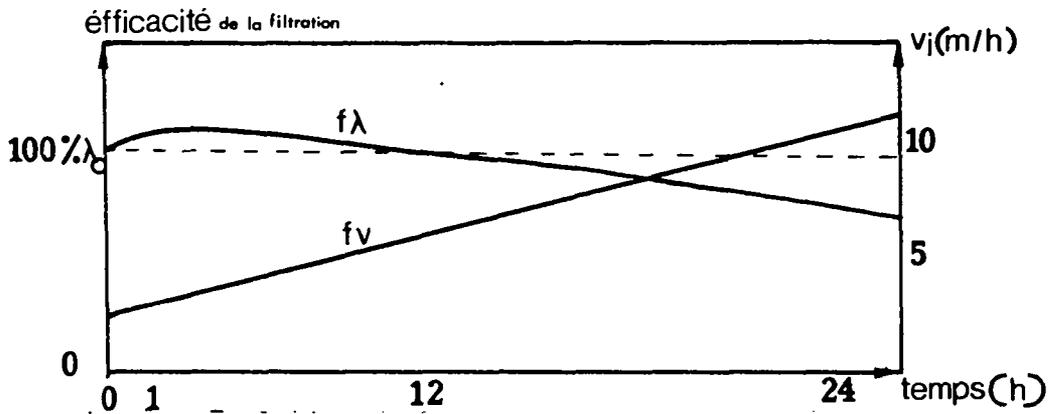


Fig. 12. Evolution de l'efficacité et de la vitesse de filtration au cours du temps

Seule la fin des deux courbes correspond à une variation inverse des deux paramètres. Ce qui signifie clairement que la théorie actuelle ne permet pas d'expliquer toute la première partie du cycle de filtration, à savoir la phase de maturation du filtre, observée en pratique. Cette remarque rejoint les travaux de RICHARD et CROCE-SPINELLI (10). Au cours d'un cycle de filtration, la qualité de l'eau filtrée varie. La turbidité commence par décroître, ce qui correspond à la période dite "de maturation" du filtre, puis reste stable pendant un certain temps avant d'augmenter : c'est alors la "crevaison" du filtre. (cf. fig. 13).

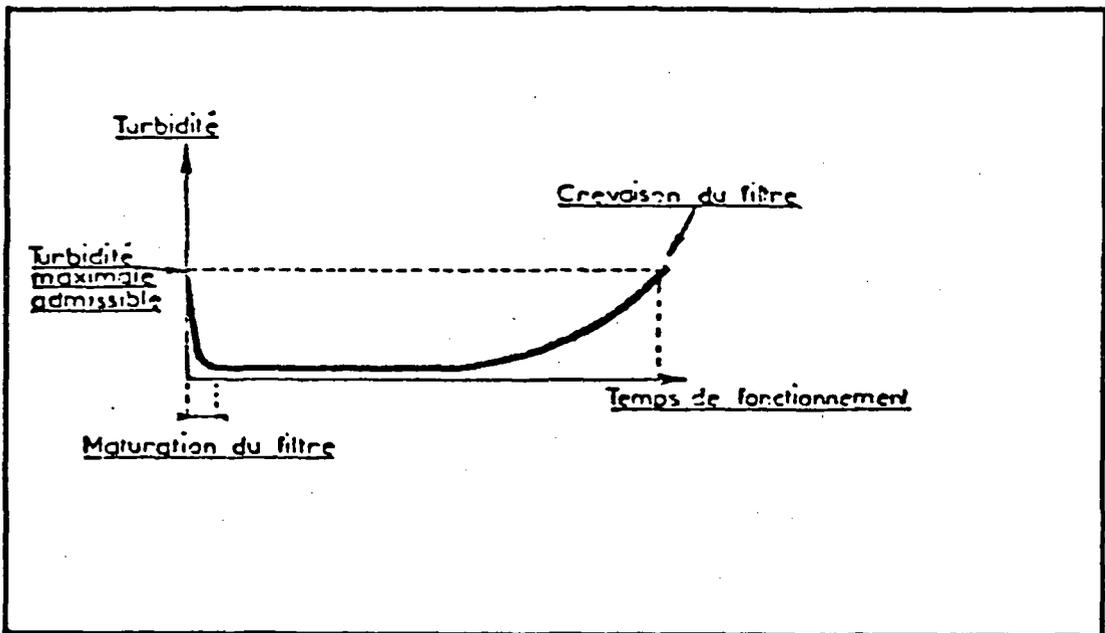


Fig. 13. Evolution de la turbidité en fonction du temps (d'après RICHARD et CROCE-SPINELLI (10)).

Pour tracer la courbe théorique,  $C = f(t)$ , la méthode DEGREMONT (10) utilise l'expression théorique de IWASAKI (12) :

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \lambda C$$

avec  $\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)$  qui est l'équation de MINTS et MAROUDAS ( $y = z = 0$  et  $x = 1$ ).

Il vient :  $-\frac{\partial C}{\partial L} = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right) C$

Un bilan matière sur un élément de couche filtrante de longueur  $dl$  et de section  $S$  donne l'équation :

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{1}{v} \frac{d\sigma}{dt} \quad v : \text{vitesse de filtration}$$

De l'intégration de ces deux équations on obtient :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\lambda_0 v C_0}{\sigma_u}} + (e^{\lambda_0 L} - 1)}$$

d'où la courbe :

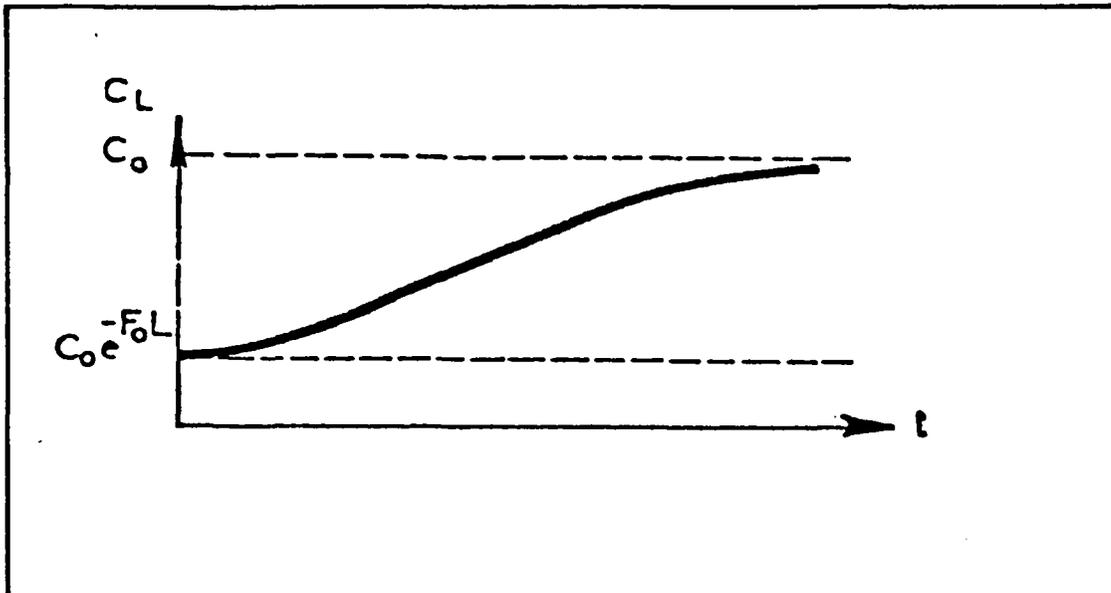


Fig. 14. Evolution de la concentration du filtrat en fonction du temps (modèle théorique). (d'après RICHARD, M., CROCE-SPINELLI, M. (10).)

La théorie mathématique ne peut donc pas expliquer la période de "maturation" du filtre.

La théorie moderne sur la clarification tient beaucoup plus compte des mécanismes de la filtration comme nous allons le voir.

. Théorie moderne de la clarification (aspect microscopique). Les processus physiques intervenant dans les mécanismes de transport et de rétention des particules en suspension ont des effets-majeurs sur la qualité de l'eau filtrée. Le rendement du filtre est lié à l'efficacité des mécanismes de transport et de fixation. D'après O'MELIA (6), AMIRTHARAJAH (13), et d'autres (9) :

$$\lambda = \frac{3}{2} \left[ \frac{(1 - \epsilon_0)}{d_c} \right] \eta \left( (n_c)_I + (n_c)_D + (n_c)_G \right)$$

avec :  $\varepsilon_0$  : porosité du filtre propre  
 $\eta$  : facteur de collision efficace ou nombre de contacts entre particule en suspension et sable avec fixation

---

nombre total de contacts

$d_c$  : diamètre du collecteur (grain de sable)  
nombre de collisions entre sable et suspension

$n_c$  : 

---

nombre de particules qui ont approché du grain de sable ou facteur de transport efficace

$$n_c = (n_c)_I + (n_c)_D + (n_c)_G$$

où :  $(n_c)_I = \frac{3}{2} \frac{d_p^2}{d_c^2}$  paramètres d'interception.

avec  $d_p$  : diamètre de la particule

$$(n_c)_D = 4,04 P_e^{-2/3} = \text{paramètre de diffusion}$$

$$P_e = \frac{v d_c}{D_p} \text{ nombre de Peclet}$$

$$D_p = \frac{\bar{k} T}{3\pi\mu} d_p \text{ coefficient de diffusion d'Einstein pour des suspensions}$$

$\bar{k}$  : constante de Boltzmann

T : température en °K

$\mu$  : viscosité dynamique de l'eau

v : vitesse de filtration.

$$(n_c)_G = \frac{g (\rho_p - \rho)}{18 \mu v} d_p^2 = \text{paramètre de décantation}$$

g : accélération de la pesanteur

$\rho_p$  : masse volumique de la particule

$\rho$  : masse volumique de l'eau

D'après l'équation de IWASAKI (12)

$$-\frac{\partial C}{\partial L} = \lambda C$$

et  $\lambda = \frac{3}{2} \frac{(1 - \epsilon_0)}{d_c} \eta_{nc}$  il vient :

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\lambda L} = e^{-\frac{3}{2} \frac{(1 - \epsilon_0)}{d_c} \eta_{nc} L}$$

$$\frac{C}{C_0} = e^{-\frac{3}{2} (1 - \epsilon_0) \eta_{nc} \frac{L}{d_c}}$$

$\left\{ \begin{array}{l} C : \text{concentration de l'eau filtrée} \\ C_0 : \text{concentration de la suspension} \\ \quad \text{à l'instant zéro.} \end{array} \right.$

Cette équation est très importante pour apprécier l'efficacité théorique de la filtration. En effet la fig. 15 montre quelle est l'efficacité du transport en fonction de la taille des particules. Comme il était précisé au paragraphe précédent, la maîtrise de ce mécanisme est essentielle pour que la qualité de l'eau filtrée soit bonne.

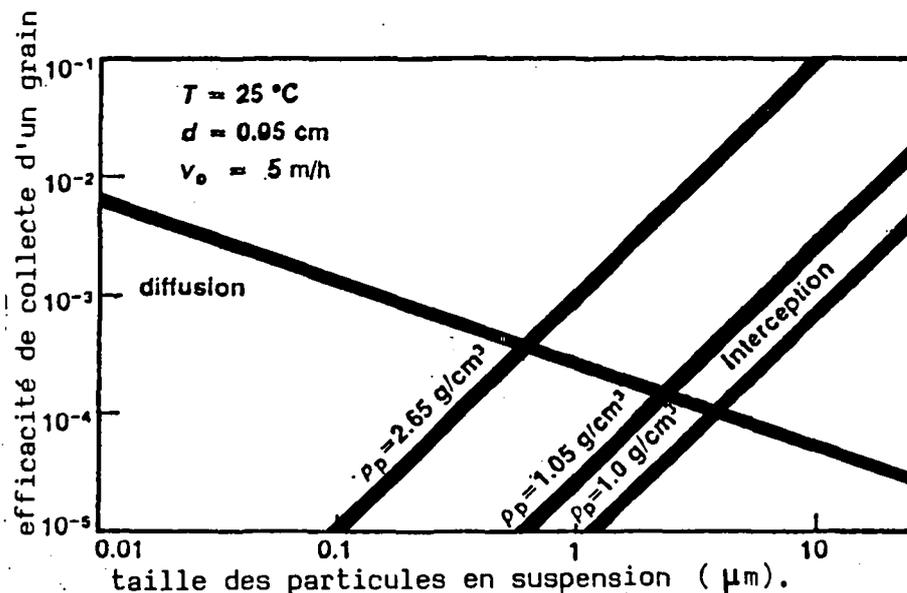


Fig. 15. Effet de la taille des particules sur l'efficacité de la collecte par transport dans un filtre (d'après O'MELIA (6)).

Les particules de moins de  $1 \mu\text{m}$  de diamètre sont transportées et retenues grâce aux mouvements Browniens (diffusion). Les particules plus grosses sont soumises à la décantation et à l'interception. Toutefois, il existe une région de minimum d'efficacité pour des particules d'environ  $1 \mu\text{m}$  de diamètre. Ceci est illustré sur la fig. 16.

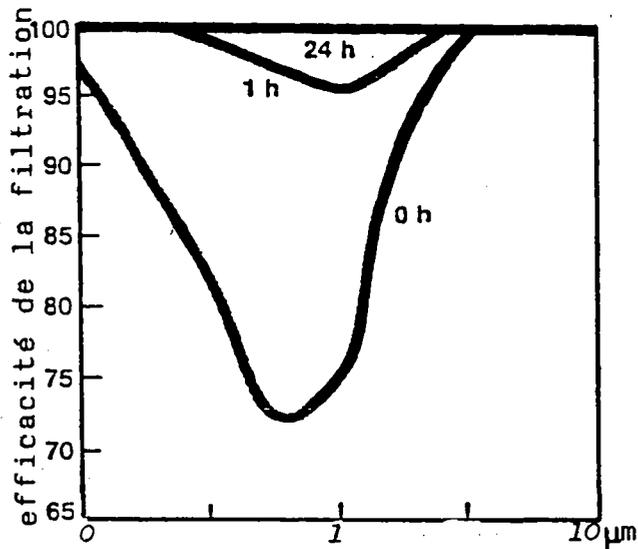


Fig. 16. Effet de la taille des particules et du temps de filtration sur les performances du filtre (d'après O'MELIA (6)).

YAO cité par IVES (4) a testé expérimentalement ces conclusions, en filtrant différentes solutions de microsphères de polystyrène monodispersées sur des sphérules revêtues d'un polyélectrolyte (cationique). Dans la gamme de  $0,1$  à  $26 \mu\text{m}$ , avec des microsphères de densité  $1,05 \text{ g/cm}^3$ , il a trouvé un minimum de rendement d'élimination à  $1 \mu\text{m}$  de diamètre.

### 1.2.2 - Perte de charge

La clarification de la suspension par le filtre, provoque un dépôt sur les grains de sable. Le dépôt diminue le volume des pores et s'oppose à l'écoulement. En terme d'hydraulique, le colmatage du filtre correspond à une augmentation de la perte de charge au cours du temps. Le paragraphe qui suit traite de l'expression mathématique de la perte de charge dans un filtre.

L'écoulement à travers un filtre est laminaire (nombre de Reynolds  $R < 5$ ). La vitesse de filtration obéit alors aux lois de l'écoulement en milieu poreux en régime laminaire :

$$V = K \frac{h}{L} \text{ Loi de Darcy.}$$

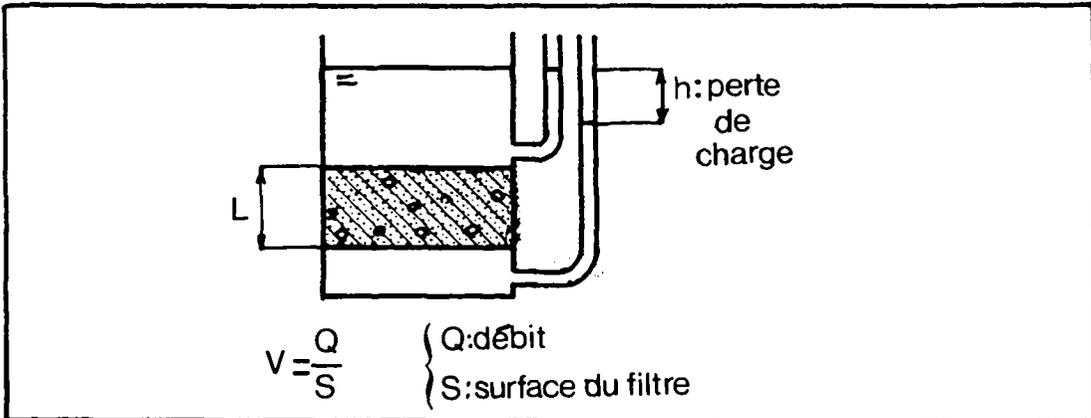


Fig. 16. Loi de Darcy.

- $V$  : vitesse de filtration (m/h)
- $K$  : coefficient de perméabilité de Darcy (m/h)
- $L$  : profondeur du filtre (m)
- $h$  : perte de charge du filtre (m)

D'après le théorème de VASHY-BUCKINGHAM (18), la perte de charge unitaire dans une canalisation de diamètre  $D$  est de la forme :

$$J = \frac{jU^2}{2gD}$$

avec

- $U$  : vitesse moyenne de l'eau dans la conduite.
- $j$  : coefficient de perte de charge unitaire.

Dans le cas d'un écoulement laminaire (cas de la filtration à travers un lit de sable), le coefficient de perte de charge est :

$$j = \frac{64}{R} \quad R : \text{nombre de Reynolds}$$

$$d'o\grave{u} \quad J = \frac{32 U^2}{gDR} \quad R = \frac{UD}{\nu}$$

$$J = \frac{32 \nu U^2}{gDUD} \quad \nu : \text{viscosité cinématique}$$

$$J = \frac{32 \nu U}{gD^2} \quad (2 - 2)/1/$$

Cherchons le diamètre équivalent d'un interstice. Le rayon hydraulique des pores R est défini par :

$$R = \frac{\text{section mouillée}}{\text{périmètre mouillé}}$$

$$R = \frac{\text{section mouillée} \times \text{longueur du pore}}{\text{périmètre mouillé} \times \text{longueur du pore}}$$

$$R = \frac{\text{volume de l'eau dans les interstices}}{\text{surface des grains de sable}}$$

or  $\mathcal{E} = \text{volume de l'eau dans les pores par unité de volume de lit.}$

Le nombre de grain dans le volume V est :

$$n = \frac{(1 - \mathcal{E})}{V_0} \quad V_0 : \text{volume d'un grain}$$

La surface des grains est :  $\frac{(1 - \mathcal{E})}{V_0} S_0$

$S_0$  : surface d'un grain

$$d'o\grave{u} \quad R = \frac{\mathcal{E} V_0}{(1 - \mathcal{E}) S_0}$$

$$R = \frac{\mathcal{E} V}{(1 - \mathcal{E}) S} \quad \begin{array}{l} V : \text{volume des grains} \\ S : \text{surface sphérique} \\ \text{des grains.} \end{array}$$

Pour un canal tubulaire, le rayon hydraulique est quatre fois plus petit que le diamètre :  $d = 4 R$

Par **analogie** (approximation), le diamètre d'un interstice dans le lit de sable est :

$$D \simeq 4R = \frac{4 \varepsilon V}{(1-\varepsilon) S}$$

l'équation (2-2)/1/ nous donne :

$$J = \frac{32 \gamma U}{\frac{(4 \varepsilon V)^2}{g(1-\varepsilon)^2 S}}$$

$$J = \frac{2 \gamma U (1-\varepsilon)^2 (S)^2}{g \varepsilon^2 (V)}$$

U est la vitesse moyenne de l'eau dans les pores, c'est-à-dire la vitesse interstitielle  $v_i = \frac{V}{\varepsilon}$  (V : vitesse de filtration)

d'où

$$J = \frac{2 V (1-\varepsilon)^2 (S)^2}{g \varepsilon^3 (V)}$$

Compte tenu de l'approximation ( $D \simeq 4 R$ ), puisque les pores ne sont pas exactement des canaux tubulaires, il convient d'introduire une constante empirique k telle que :

$$J = \frac{k V (1-\varepsilon)^2 (S)^2}{g \varepsilon^3 (V)}$$

avec k généralement proche de 5 pour un filtre propre (les interstices ne sont pas encore à formes tubulaires).

L'équation trouvée est semblable à l'équation empirique de BLAKE-KOZENY-CARMAN (14)

$$\frac{h}{L} = \left(\frac{k}{g}\right) V \frac{(1-\varepsilon)^2 (S)^2}{\varepsilon^3 (V)}$$

D'après IVES (1), l'équation de Kozeny-Carman

$$\frac{\gamma_H}{\gamma_L} = \frac{k \gamma V S^2}{g \varepsilon^3}$$

où : H est la perte de charge

S : surface des grains de sable par unité de volume de filtre.

conduit à 
$$\left(\frac{\partial H}{\partial L}\right)_0 = \frac{k \gamma V S_0^2}{g \xi_0^3} \quad \text{dans le cas d'un filtre propre.}$$

$\xi_0$  : porosité du filtre propre.

$S_0$  : surface des grains propres par unité de volume du filtre.

La surface S évolue au cours du temps (cf. § 2.1), une expression possible de sa valeur en fonction du dépôt est :

$$S = S_0 \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \xi_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{\xi_0}\right)^z$$

avec  $\xi = \xi_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\xi_0}\right)$  porosité du filtre encrassé.

$\sigma$  = volume du dépôt par unité de volume du filtre.

Dans le cas où  $y = z = 1$ ,

$$S = S_0 \left(1 + \frac{\sigma}{1 - \xi_0}\right) \left(1 - \frac{\sigma}{\xi_0}\right)$$

d'où 
$$\left(\frac{\partial H}{\partial L}\right) = \frac{k \gamma V S_0^2}{g \xi_0^3} \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{1 - \xi_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{\sigma}{\xi_0}\right)}$$

Soit 
$$\frac{\left(\frac{\partial H}{\partial L}\right)}{\left(\frac{\partial H}{\partial L}\right)_0} = \frac{\left(1 + \frac{\sigma}{1 - \xi_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{\sigma}{\xi_0}\right)}$$

Le développement limité du second terme nous donne :

$$\frac{(\partial H)}{(\partial L)} / \frac{(\partial H)}{(\partial L)_0} = 1 + \left( \frac{2 \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} + 1 \right) \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (2-2)/2/$$

$$+ \left( \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} + 1 \right)^2 \left( \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} + 1 \right)^3 \left( \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \right)^3 + \dots$$

En première approximation, quand  $\sigma \rightarrow 0$ , c'est-à-dire lorsque le filtre n'est pas encore colmaté,

$$\frac{(\partial H)}{(\partial L)} / \frac{(\partial H)}{(\partial L)_0} \approx 1 + \left( \frac{2 \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} + 1 \right) \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

soit  $\frac{(\partial H)}{(\partial L)} / \frac{(\partial H)}{(\partial L)_0} \approx 1 + a\sigma$  , a : constante

soit  $\frac{(\partial H)}{(\partial L)} - \frac{(\partial H)}{(\partial L)_0} = b\sigma$  , b : constante

La perte de charge par unité de profondeur est proportionnelle au dépôt spécifique, ce qui apparaît naturel du point de vue expérimental.

L'évolution de la perte de charge en fonction de la profondeur du filtre à partir de cette équation conduit aux courbes suivantes : (cf. fig. 17.).

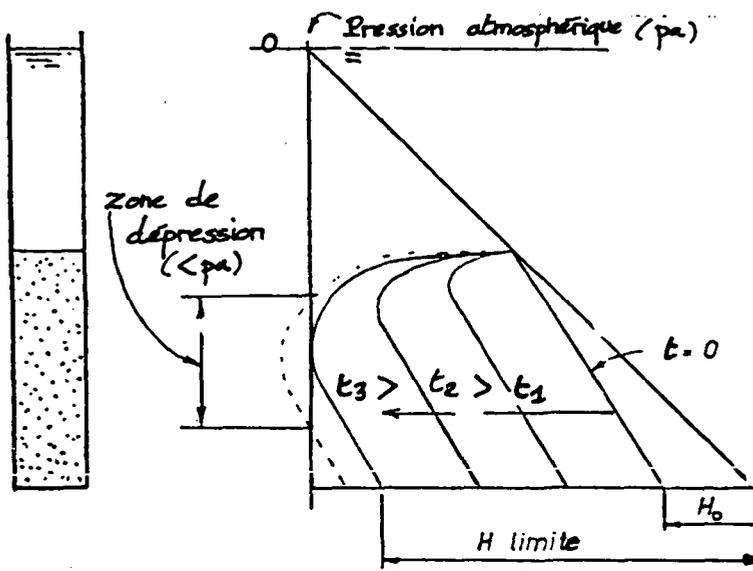


Fig. 17. Profil de la perte de charge en fonction de la profondeur et du temps de fonctionnement du filtre (4).

La perte de charge est bien une fonction linéaire du dépôt, tant que le filtre est propre ( $t=0$ ). Dès que le filtre se colmate, le volume du dépôt  $\sigma$  n'est plus négligeable devant la porosité  $\xi_0$ , et l'expression de  $H$  en fonction de  $\sigma$  n'est plus linéaire mais du second, voire du troisième degré comme le montre l'équation (2-2)/2/.

Les courbes obtenues montrent l'avancement du front de colmatage au cours du temps. A  $t_1$ , le filtre n'est colmaté que dans sa partie supérieure. A  $t_3$ , le front de colmatage est déjà au  $2/3$  du filtre. Il est possible hydrauliquement de continuer la filtration, mais il se produit sous la surface colmatée, une zone de **dépression** (pression locale inférieure à la pression atmosphérique). Les gaz ( $O_2$  et  $CO_2$ ) dissous dans l'eau filtrée se trouvent alors à une pression inférieure à leur condition de stabilité, et s'échappent. Les bulles d'air formées nuisent à l'écoulement et "colmatant" certaines parties du filtre provoquent une augmentation de la vitesse interstitielle ailleurs. Il s'en suit une érosion dans le filtre et des risques de percement sont à craindre (création de canaux préférentiels où l'énergie cinétique de l'eau est telle qu'il ne peut y avoir de dépôts, mais érosion des dépôts existants).

Pour intégrer l'équation (2-2)/2/ dans toute l'épaisseur du lit, il faut émettre certaines **hypothèses** :

- le dépôt est une fonction linéaire du temps,
- la concentration du filtrat est de moins de 5 % de la concentration de l'eau décantée.

Ce qui permet de trouver une relation linéaire entre la perte de charge et la durée de vie du filtre :

$$H = H_0 + \text{const} \times t \quad (\text{cf.}(1))$$

$t$  : temps de fonctionnement du filtre.

Dans la **pratique** les courbes obtenues expérimentalement montrent effectivement une relation **linéaire** au début du cycle de filtration, puis la perte de charge augmente de façon **exponentielle**.

L'expression théorique du coefficient k de Darcy par DEGREMONT (11) conduit à une relation exponentielle entre la perte de charge et le temps de fonctionnement du filtre.

de 
$$\frac{\partial H}{\partial L} = k V$$

et de 
$$k = k_0 \frac{1 + (a-1) \frac{\sigma}{\sigma_u}}{1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}} \quad \text{ou} \quad \sigma = f(e^t) \quad (\text{hypothèse DEGREMONT (11)}).$$

- $k_0$  : coefficient de Darcy (m/h) du filtre propre.
- $\sigma$  : volume du dépôt par unité de volume du filtre.
- $\sigma_u$  : volume ultime
- $k$  : coefficient de Darcy, par hypothèse  $k = k_0$  à  $t = 0$

il vient après intégration (cf. (11))

$$H = k_0 V l + k_0 V \frac{a(e^{At} - 1)}{\lambda_0} (1 - e^{-\lambda_0 l})$$

avec 
$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \frac{1 - e^{-At}}{1 + e^{-At}(e^{\lambda_0 l} - 1)}$$

où 
$$A = \frac{\lambda_0 V C_0}{\sigma_u} \quad (s^{-1})$$

en posant  $H_0 = k_0 V l$  perte de charge du filtre propre, l'équation devient :

$$H = H_0 + \frac{k_0 V (1 - e^{-\lambda_0 l})}{\lambda_0} a (e^{At} - 1)$$

$$H = H_0 + K e^{At} - K' \quad K, K', \text{ constantes}$$

Les deux modèles présentés (IVES (1) et DEGREMONT (11)), conduisent aux courbes de la fig. 18. ci-dessous.

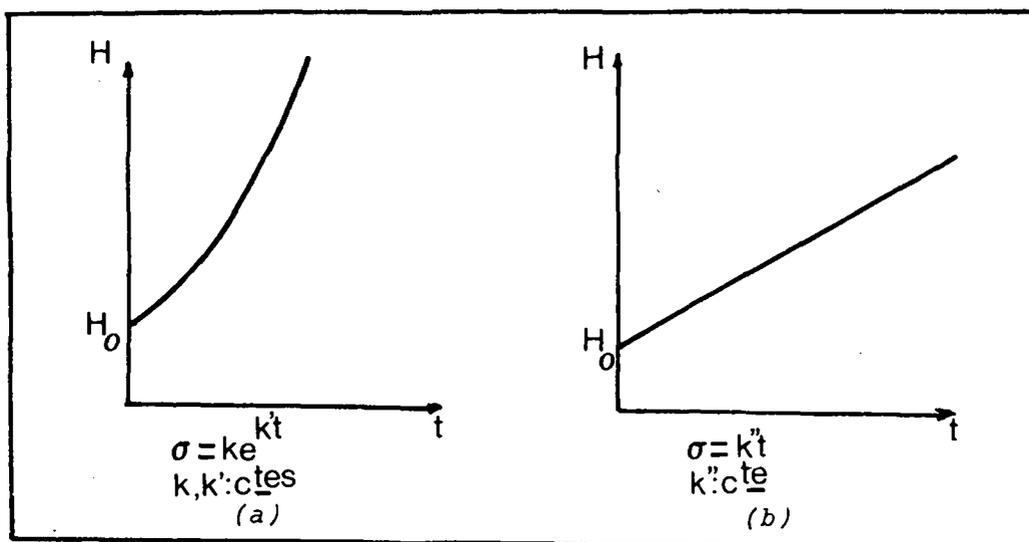


Fig. 18. Evolution de la perte de charge au cours du temps.

(a) modèle DEGREMONT ; (b) modèle d'IVES.

Ces deux expressions de la perte de charge en fonction du temps sont intéressantes pour interpréter l'évolution des courbes de perte de charge rencontrées dans la pratique. Elles permettent surtout d'évaluer le temps mis pour un filtre donné, pour atteindre sa perte de charge maximale admissible. Le chapitre suivant va montrer jusqu'à quel point les modèles mathématiques peuvent servir le concepteur.

## II - OPTIMISATION DE LA FILTRATION



Un filtre possède des propriétés physiques directement liées à sa **construction** et à son **exploitation**. Comme nous venons de le voir, la filtration est un phénomène physico-chimique modélisable sous forme mathématique. Mais la complexité des mouvements particule-fluide, la variabilité de la qualité de l'eau brute, ne permettent pas actuellement de prédire complètement le fonctionnement d'un filtre. Les études d'**optimisation** présentées par MINTS (7) montrent quels sont les paramètres à surveiller pour avoir une filtration efficace.

En tant qu'outil de fonctionnement, un filtre possède des caractéristiques intrinsèques liées à sa construction et à son exploitation. La conception et la construction du filtre fixent une profondeur donnée du lit filtrant, et une perte de charge limite admissible (perte de charge à ne pas dépasser pour éviter le phénomène de dépression développé précédemment).

L'exploitation du filtre impose une **qualité de filtrat limite**, et un **temps de fonctionnement** correspondant.

L'optimum de fonctionnement est atteint lorsque la construction et l'exploitation sont conduites pour que le filtre atteigne sa perte de charge limite en même temps que la qualité du filtrat se détériore.

Pour un filtre donné (granulométrie, vitesse de filtration, perte de charge limite, qualité de filtrat, connues et constantes), les courbes de fonctionnement (ou caractéristiques) fournissent l'optimum de construction et d'exploitation, c'est-à-dire, le temps de fonctionnement et la profondeur du lit filtrant de façon à se trouver dans des conditions optimales (qualité du filtrat et perte de charge optimales). Les courbes de la fig. 19, montrent comment connaître l'optimum de filtration d'un filtre.

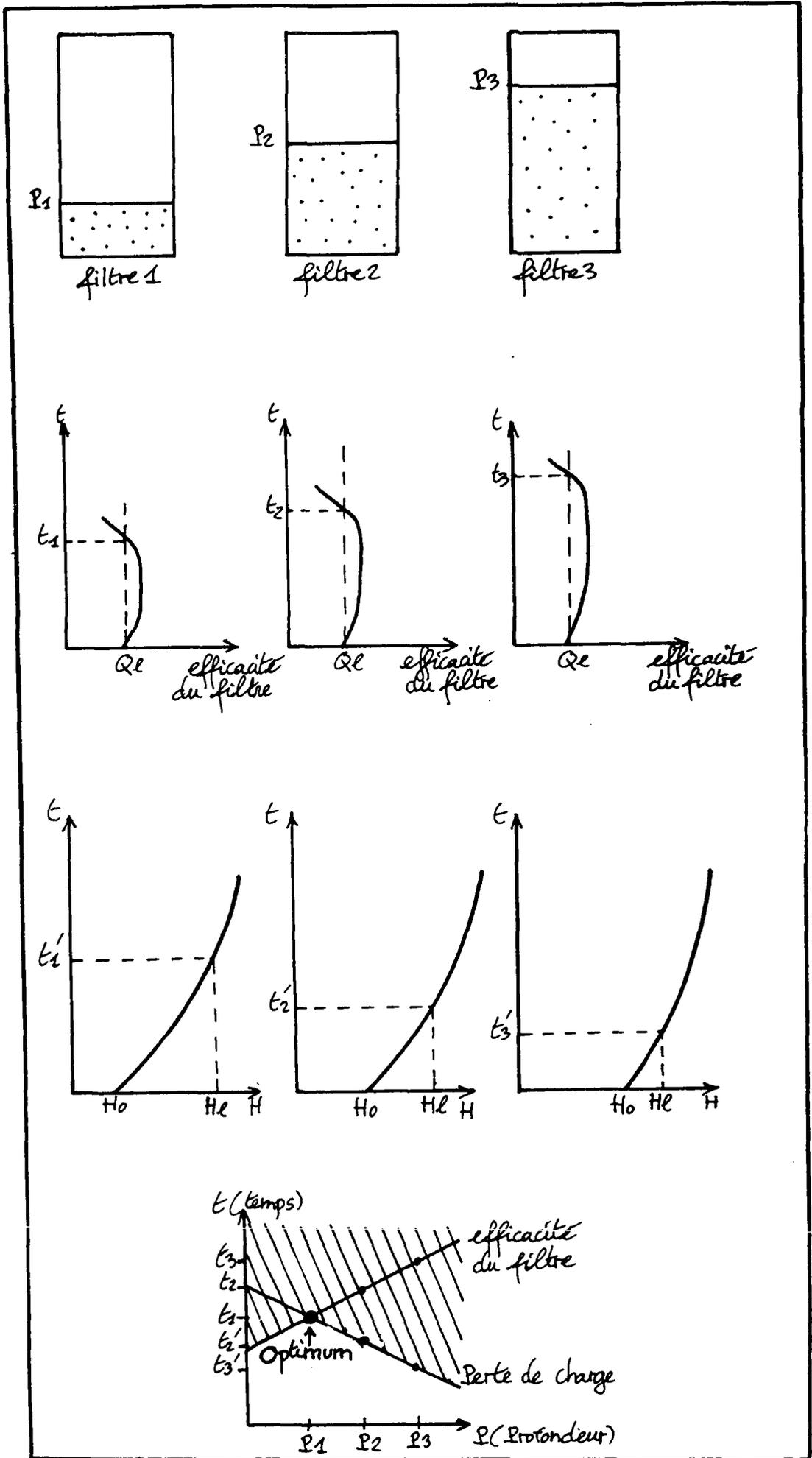


Fig. 19. Construction des caractéristiques d'un filtre. Optimisation (d'après MINTS (7)).

La fig. 20., est un schéma type de mauvais fonctionnement d'un filtre. La valeur limite de qualité du filtrat est atteinte avant la perte de charge admissible.

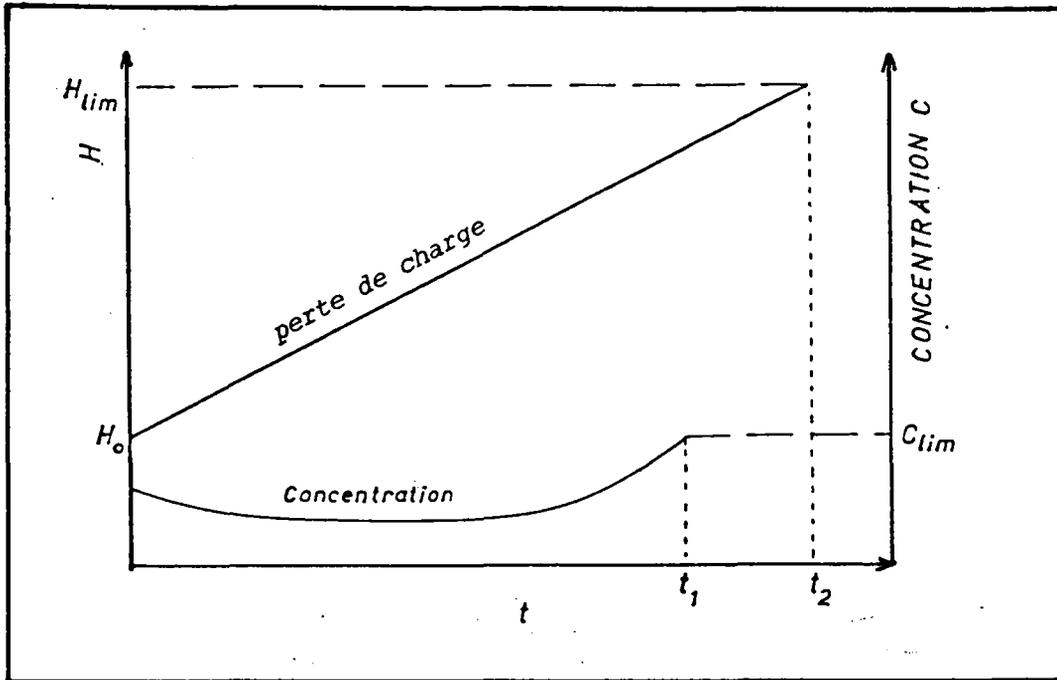


Fig. 20. Evolution de la perte de charge et de la qualité du filtrat en fonction du temps (d'après MINTS (7)).

Dans un cas comme celui-ci, si l'exploitation du filtre est telle, que le filtre n'est lavé que lorsqu'il est entièrement colmaté, il risque d'y avoir des départs de matière en suspension et altération de la qualité du filtrat avant la fin du cycle. Il est possible d'optimiser le filtre en changeant un des paramètres de construction ou d'exploitation. Par exemple, en augmentant la vitesse de filtration, la durée du cycle sera certes diminuée, mais les risques de relargage s'amenuiseront. Il se peut qu'une vitesse de filtration trop élevée conduise à des durées de cycle trop courtes et à des lavages trop fréquents.

La fig. 21. montre que pour un filtre d'épaisseur donnée  $L_f$ , fonctionnant dans de mauvaises conditions (voir fig. 20.), il est possible d'être dans une situation optimale pour deux vitesses de filtration différentes.

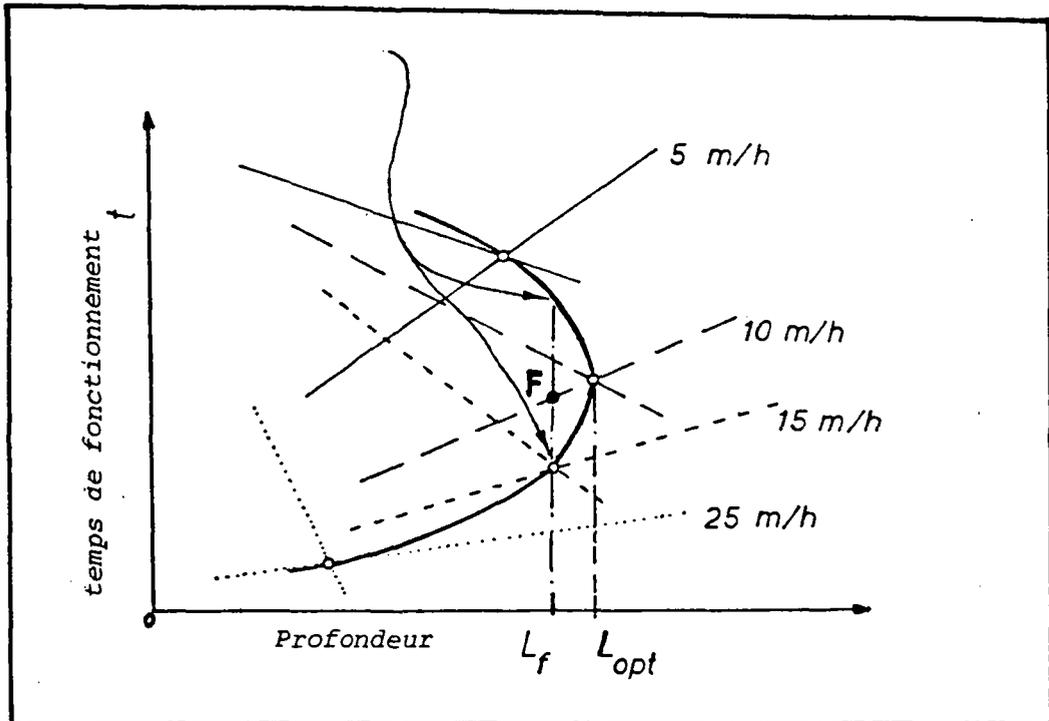


Fig. 21. Lieu des optimums pour différentes vitesses de filtration (d'après MINTS (7)).

L'optimum peut être atteint aussi, sans faire varier la vitesse de filtration, en augmentant la profondeur du lit. Dans le cas de la fig. 21., il suffit de remplacer  $L_f$  par  $L_{opt}$  en rajoutant du sable. Mais c'est parfois impossible par construction. Cependant il existe encore une possibilité d'atteindre l'optimum plus facilement, en utilisant une granulométrie du sable appropriée. La fig. 22. montre que la durée d'un cycle peut être accrue en fonction de la taille des grains.

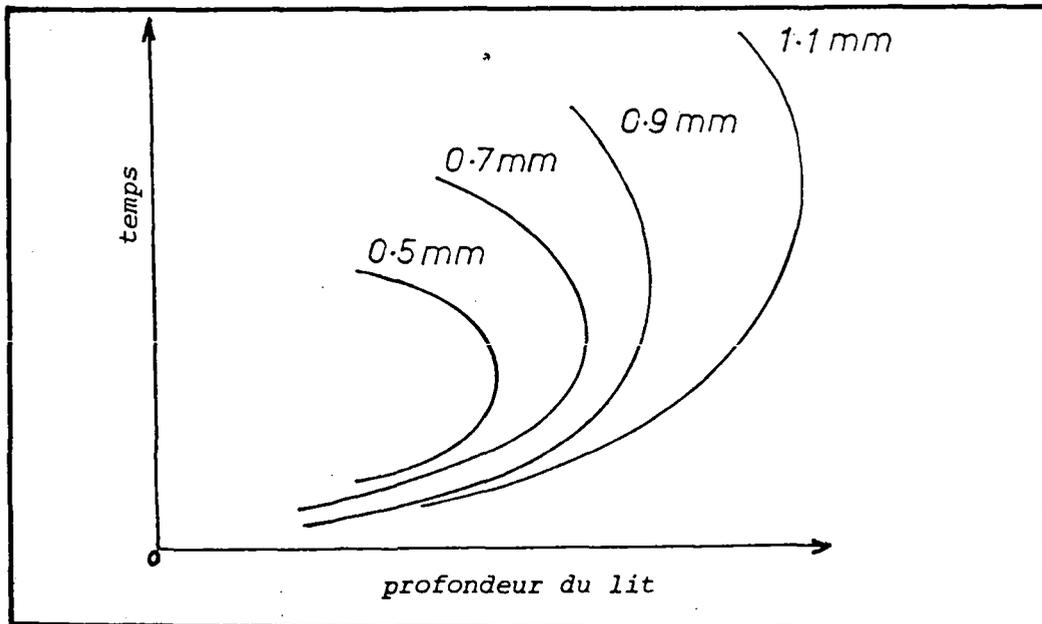


Fig. 22. Lieu des optimums pour différentes tailles d'un milieu filtrant uniforme (d'après MINTS (7)).

L'optimisation présentée ci-dessus, tient compte de paramètres physiques (vitesse de filtration, profondeur du lit, granulométrie du sable) et s'applique donc surtout à modifier le paramètre hydraulique de conception du filtre, la perte de charge admissible, la qualité de l'eau filtrée, par un prétraitement approprié (cf.1). Mais il est difficile de l'énoncer sous une forme utilisable pour prédire l'évolution future du cycle de filtration.



## CH II/ - ETUDE EXPERIMENTALE

---

## I - AXES D'ÉTUDE



Compte tenu des connaissances apportées par la synthèse bibliographique, l'étude s'est organisée selon deux directions :

- Recherche pratique des problèmes relatifs à la filtration.
- Collecte des données nécessaires à la compréhension et à la résolution des problèmes rencontrés.

## 1 - Paramètres à étudier

Deux paramètres fondamentaux sont à surveiller pour évaluer les problèmes de filtration :

- la qualité de l'eau filtrée,
- la perte de charge.

1.1 - La qualité de l'eau filtrée peut être déterminée par diverses mesures :

- Matières en suspension (M.E.S.)
- Turbidité
- Comptage particulaire
- Aluminium
- C.O.T.

### . Matières en suspension

D'après BISHOP (15), ce paramètre n'est pas adapté à une évaluation en continu des performances d'un filtre. La méthode de mesure nécessite un grand volume d'échantillon (500 ml), et ne convient pas à des essais en continu. Le plus grand handicap est surtout que la faible teneur en M.E.S. des eaux filtrées ne permet pas d'analyses précises et comparables.

### . Turbidité

La turbidité est une mesure fondée sur la réfraction de la lumière sur des particules en suspension dans l'eau. Compte tenu de cette propriété, la turbidité est une analyse rapide, précise, et reproductible un grand nombre de fois. Elle est de plus adaptée aux eaux très peu chargées en M.E.S. en raison de la grande sensibilité de la mesure.



Les turbidimètres sont de plus des appareils de faible dimension, robustes et facilement transportables sur le terrain. Compte tenu de tous ces avantages il est aisé de comprendre pourquoi la turbidité est un critère de référence pour évaluer les performances de la filtration. La recherche des problèmes relatifs à la qualité de l'eau filtrée s'est appuyée en grande partie sur des mesures de turbidité. Cependant la turbidité n'est pas un indicateur exact de la quantité de matières en suspension dans l'eau. SYROTYNSKI cité par BISPHOP (15) souligne (d'après des analyses dans l'Etat de New-York entre 1946 et 1967) que des eaux de surface de très faible turbidité peuvent contenir une importante quantité de matières en suspension microscopiques. Ceci s'explique par le fait que la turbidité tient compte des propriétés optiques des particules. Certains organites microscopiques, comme le plancton ne sont pas détectés par une mesure de turbidité, aussi SYROTYNSKI (14) a proposé d'utiliser le comptage particulaire comme un complément des analyses de turbidité.

#### . Comptage particulaire

SYROTYNSKI cité par BISPHOP (15) a recommandé d'établir un critère de comptage particulaire de 200 asu/ml. L'asu ou unité standardisé d'aire (usa) est définie comme l'aire d'un carré de 400 m<sup>2</sup>. C'est une mesure de l'espace occupée par le plancton ou des débris de végétaux dans un volume donné. Les mesures actuelles de comptage particulaire s'expriment en unité standardisée par ml.

Le procédé de comptage particulaire a l'avantage de recenser le nombre total de matières en suspension dans l'eau indépendamment des propriétés optiques des particules rencontrées. Contrairement à la mesure de turbidité, cette analyse tient compte des micro-organismes du plancton et des matières inertes (débris de végétaux, oeufs). L'inconvénient majeur de ce procédé est qu'il nécessite un appareillage sophistiqué et les erreurs de manipulation et d'échantillonnage posent un problème d'invalidation de la technique (15). Compte tenu des avantages et inconvénients des procédés décrits ci-dessus, le comptage particulaire n'a été utilisé que comme paramètre d'analyse, d'aide à l'interprétation pour deux unités d'eau potable seulement.

D'autres mesures de la qualité de l'eau filtrée doivent être menées, pour apprécier l'efficacité de la filtration.

Par exemple, l'évolution de la teneur en aluminium de l'eau filtrée au cours d'un cycle complet de filtration (5) permet de remarquer qu'en début de cycle (pendant 1 h environ) le filtre est beaucoup moins efficace qu'après.

La fig. 23. ci-dessous, le montre.

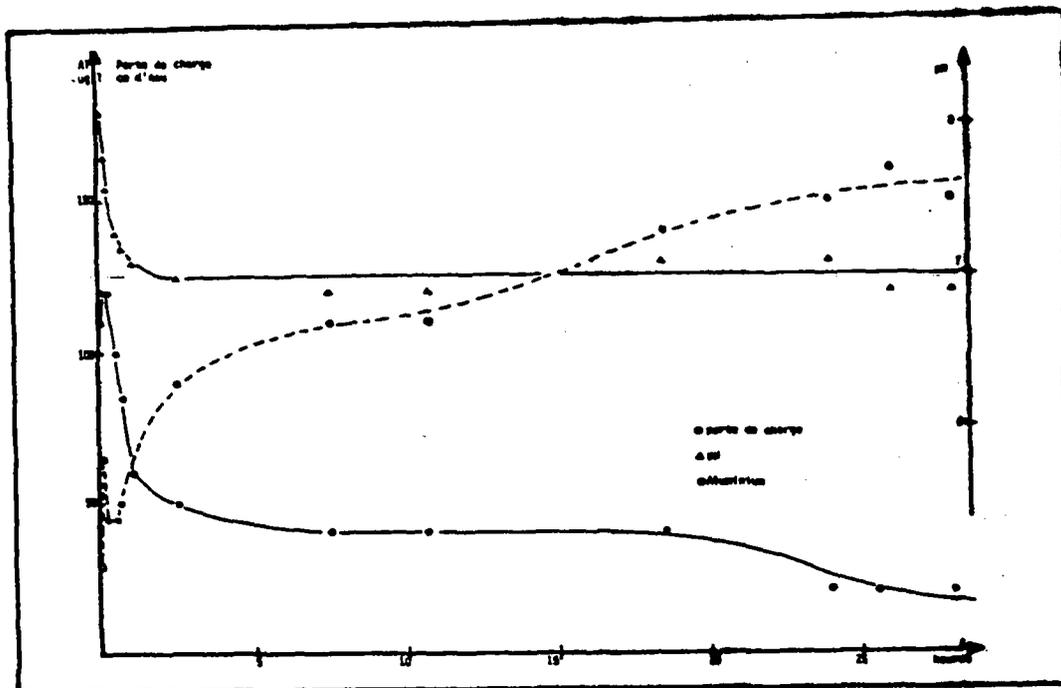


Fig. 23. : Evolution de la teneur en aluminium de l'eau filtrée au cours d'un cycle de filtration (d'après CLEMENT, SEUX, MOUSSA (5)).

La mesure d'aluminium peut être considérée comme indication d'un possible problème de filtration. Une autre mesure ponctuelle peut apporter un complément d'analyse, comme par exemple le Carbone Organique Total (C.O.T). Des mesures de C.O.T effectuées en parallèle sur l'eau filtrée et décantée renseignent sur la capacité de rétention en matières organiques du filtre.

### 1.2 - Perte de charge

La mesure de la perte de charge en fonction du temps permet d'avoir une idée de l'évolution du colmatage dans le filtre. Les études d'optimisation (cf. II) montrent que ce paramètre doit être évalué conjointement à des mesures de la qualité du filtrat.

D'après l'équation de KOZENY :

$$\frac{h}{l} = \left(\frac{k}{g}\right) \gamma v \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \left[\frac{A}{v}\right]^2$$

il apparaît que pour comparer l'expression théorique avec les courbes obtenues dans la pratique, il faut connaître les caractéristiques du fluide et du lit filtrant. A savoir :

- la viscosité du fluide :  $\gamma$
- la vitesse de filtration :  $v$
- la surface des grains de sable :  $A$
- la porosité du lit :  $\epsilon$

La connaissance des caractéristiques d'un filtre propre est importante pour positionner le premier point  $H_0$  de la courbe.

$$H = f(t) \text{ (cf. Fig. 17. et Fig. 18. § 2.2)}$$

La viscosité du fluide est connue théoriquement en fonction de la température de l'eau : à 20°C,  $\gamma = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

La vitesse de filtration est fonction du débit et de la surface plane du lit filtrant, c'est une donnée accessible facilement sur le terrain.

La surface des grains de sable et la porosité du lit sont deux paramètres connus dans la littérature, en fonction de la granulométrie du lit. Deux valeurs sont donc à déterminer impérativement sur le terrain, la vitesse de filtration et la granulométrie du filtre.



## II - PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX



Nous venons de voir quels sont les paramètres à suivre pour apprécier l'efficacité de la filtration. Compte tenu des contraintes de temps, il convient de préciser le champ d'action de l'étude. Elle est limitée aux petites unités d'eau potable du bassin Seine-Normandie.

Sur 93 stations recensées sur le bassin, seules 22 correspondaient aux critères de choix :

- Filtration sur sable uniquement.
- Station de débit d'eau filtrée inférieur à  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Sept unités seulement ont été sélectionnées. L'expérimentation consiste en une analyse de la qualité des eaux filtrées et de la perte de charge au cours d'un cycle de filtration. Il s'agit maintenant de dégager une méthodologie expérimentale, compte tenu du temps imparti à l'étude.

## 1 - Matériels et méthodes

La méthode optimale aurait été de mesurer en continu la qualité des eaux en amont et en aval du filtre pendant un cycle de filtration. Le collecteur de fraction GILSON (modèle 202), a permis de réaliser des prélèvements automatiques simultanément sur l'eau décantée et filtrée, pendant les intervalles de temps programmés à l'avance. L'intérêt de prélever à la fois l'eau décantée et l'eau filtrée, est de pouvoir analyser les variations de la qualité du filtrat en fonction de celle de l'eau décantée. Aucune étude théorique n'aurait pu fournir de renseignement à ce sujet, puisque tous les modèles mathématiques existants actuellement sont fondés sur l'hypothèse d'une eau de qualité constante en amont du filtre.

La difficulté de la méthode de collecte par intervalle de temps, réside dans le fait qu'existe un décalage obligatoire dans le temps entre eau décantée et eau filtrée. En effet, l'eau décantée (sur le lit de sable), met un certain temps à traverser le filtre (fonction de la vitesse de filtration).

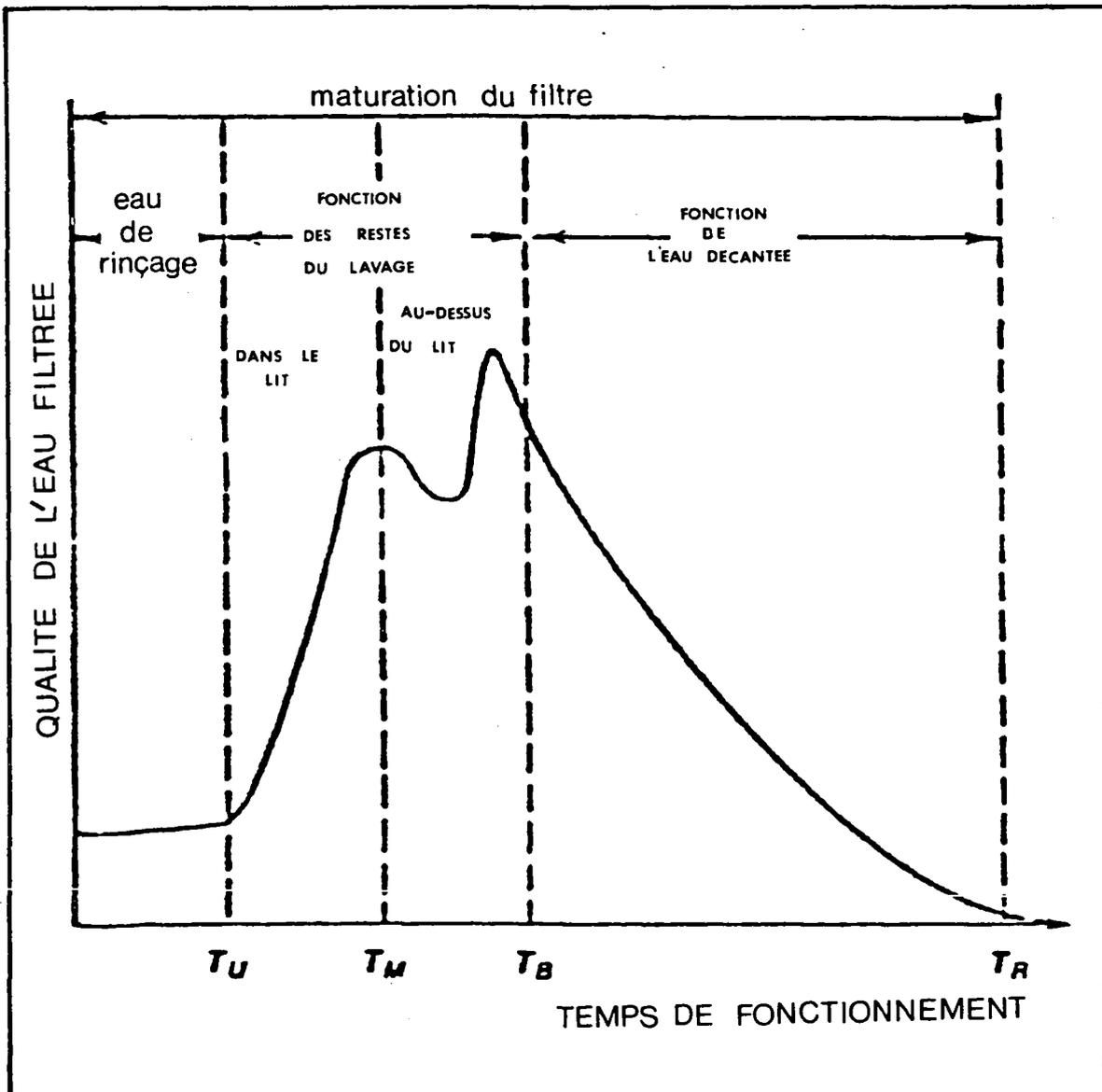
Pour obtenir des prélèvements comparables, il faut connaître le temps de décalage, et collecter en fonction de ce temps de retard. Par exemple, pour un prélèvement effectué à  $t_1$  sur l'eau décantée, il faut collecter l'eau filtrée à  $t_1 = t_0 + t$  avec  $t$  : temps de traversée du filtre. Si la vitesse de filtration est de  $5 \text{ m/h}$ , pour un filtre de  $1 \text{ m}$  de profondeur, le temps  $t = \frac{1}{5} \times 60 = 12 \text{ mn}$ .



Dans ces conditions, avec un pas de temps programmé de 12 mn, les prélèvements s'effectueraient automatiquement toutes les 12 mn, et l'échantillon d'eau décantée n° 1 ( $t$ ) correspondra à l'échantillon d'eau filtrée n° 2 ( $t_0 + t$ ).

L'évaluation de ce temps de retard  $t$  est approximative, puisqu'il est difficile de connaître exactement le temps mis par des particules en suspension pour traverser le filtre. Compte tenu des analyses à effectuer (turbidité et parfois comptage particulaire), le volume de prélèvement est de 90 ml, et le collecteur prélève par l'intermédiaire d'une pompe péristaltique GILSON à un débit de 30 ml à la minute, le prélèvement s'effectue donc pendant 3 minutes.

D'après AMIRTHARAJAH, A. et WESTEIN D.P. (13), la qualité de l'eau filtrée juste après un lavage est habituellement médiocre. Les principales causes seraient des rémanances des eaux de lavage dans le filtre et une qualité épuratoire du filtre propre médiocre. La fig. 24. représente l'évolution de la qualité du filtrat en fonction du temps.



Il faut noter que la période de mauvais fonctionnement, TB dure de 1 à 10 mn, tandis que la période dite de "maturation" TR s'étend jusqu'à 2 heures. Pour observer ce phénomène problématique en filtration, il fallait prélever pendant un intervalle de temps très court juste au début du cycle de filtration. Ces mesures ont été faites à la main la plupart du temps, avec l'aide des Fontainiers. Certains prélèvements ont été effectués sur le filtre, au cours des lavages, pour analyser la turbidité initiale de l'eau susceptible d'être filtrée, 10 à 20 mn plus tard. Conjointement à ces prélèvements rapprochés juste après le lavage, il était intéressant d'étudier le pouvoir de rétention du filtre en matières organiques et en aluminium. Les eaux filtrées contiennent en général peu d'aluminium, et pour ne pas fausser les analyses, il est important d'utiliser des flacons à bouchons jetables. Il faut conserver l'échantillon en milieu acide, non complexant avec l'aluminium, quelques gouttes d'acide nitrique concentré 0,1 N suffisent.

. Disposition du matériel expérimental.

Le schéma suivant, retrace les différentes étapes de prélèvement et situe la place de chaque appareil au fil de l'eau.

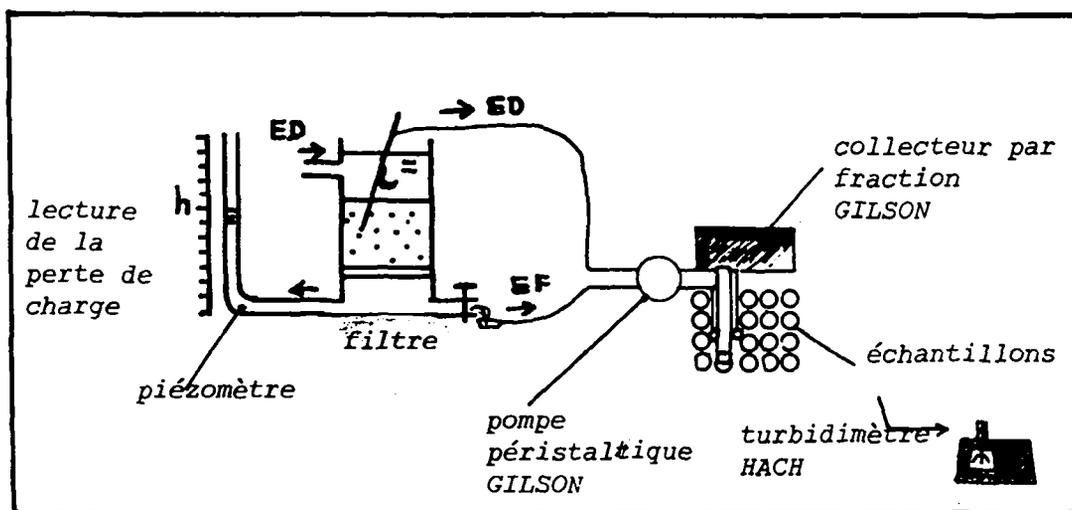
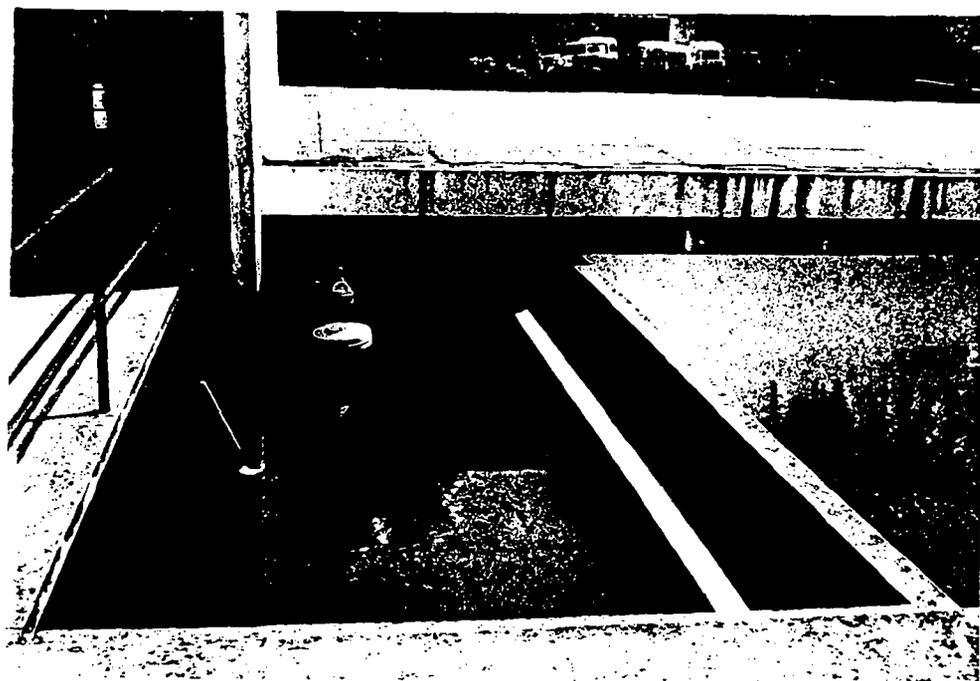
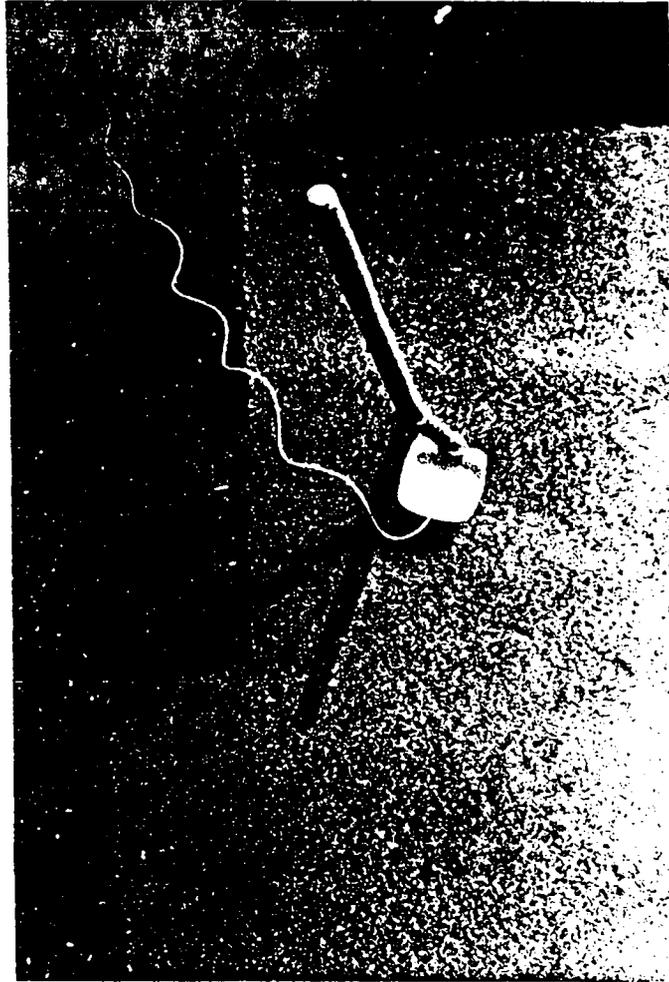


Schéma du dispositif expérimental

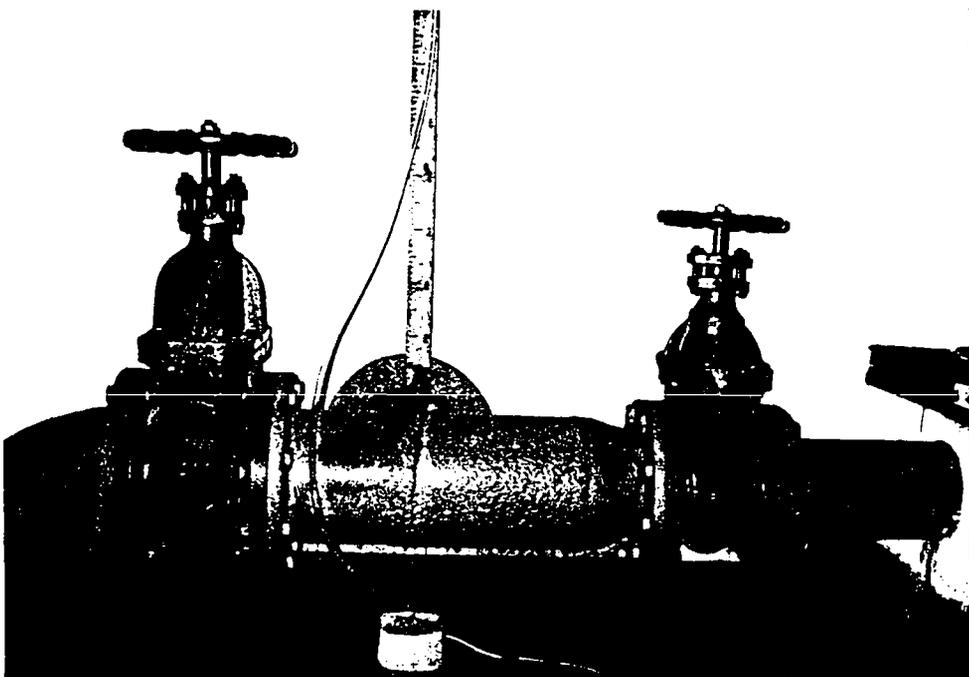
Les photographies qui suivent, prises à l'usine d'eau potable de CHESSY (Seine et Marne) décrivent le matériel expérimental. Les prélèvements s'effectuent en amont et en aval du filtre (cf. photographies 1, 2 et 3).



Ph. 1 : Prélèvement en amont du filtre (eau décantée).  
CHESSY

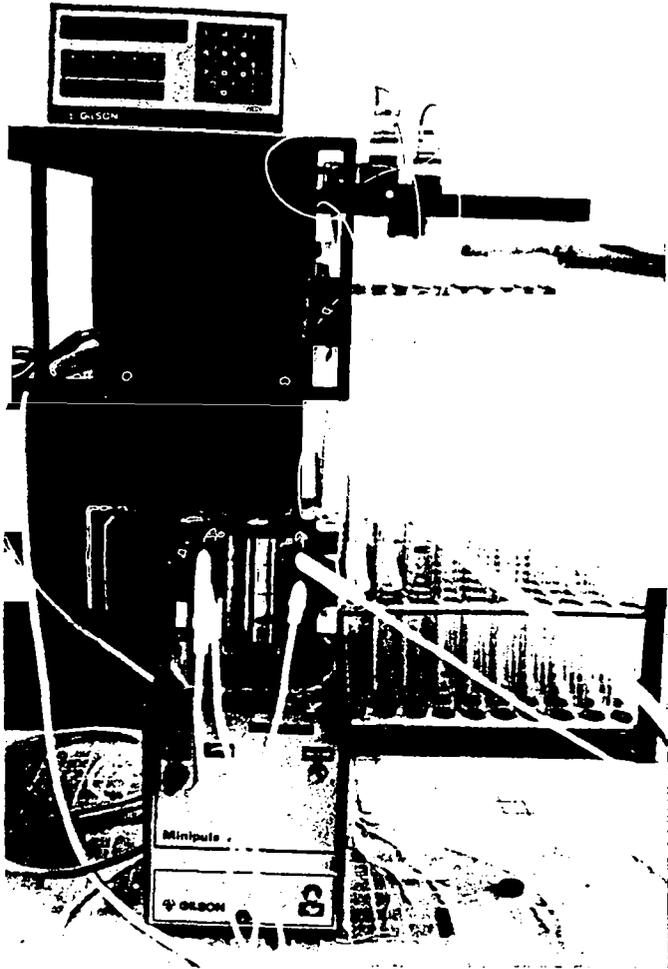


Ph. 2 : Prélèvement de l'eau décantée. CHESSY



Ph. 3 : Prélèvement de l'eau filtrée. CHESSY

Le collecteur de fraction permet de prélever jusqu'à 88 échantillons différents.

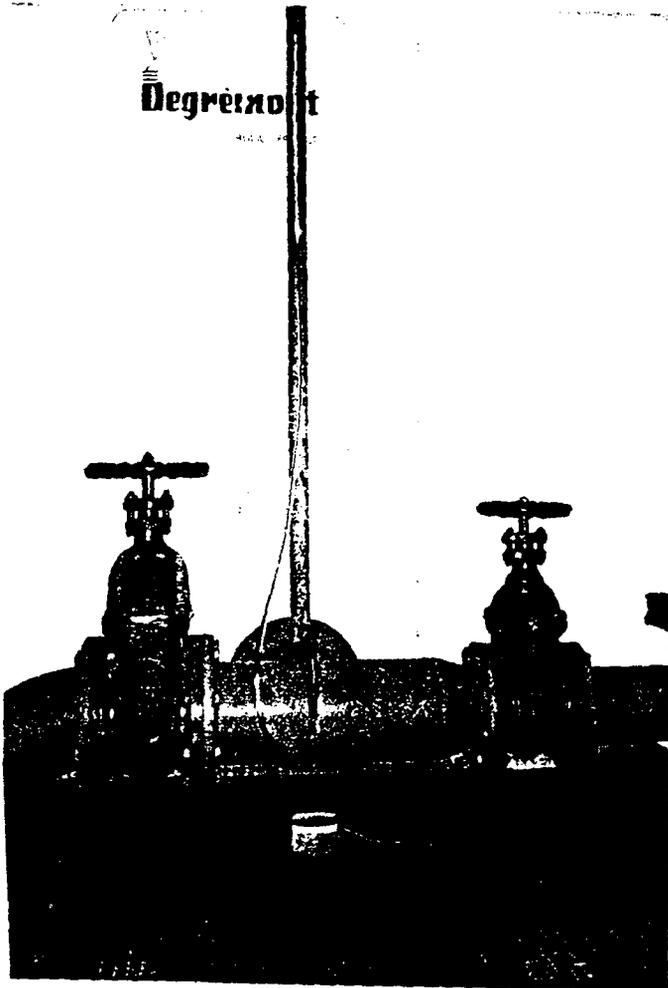


Ph. 4 : Collecteur de fraction  
GILSON (profil) et pompe  
péristaltique. CHESSY

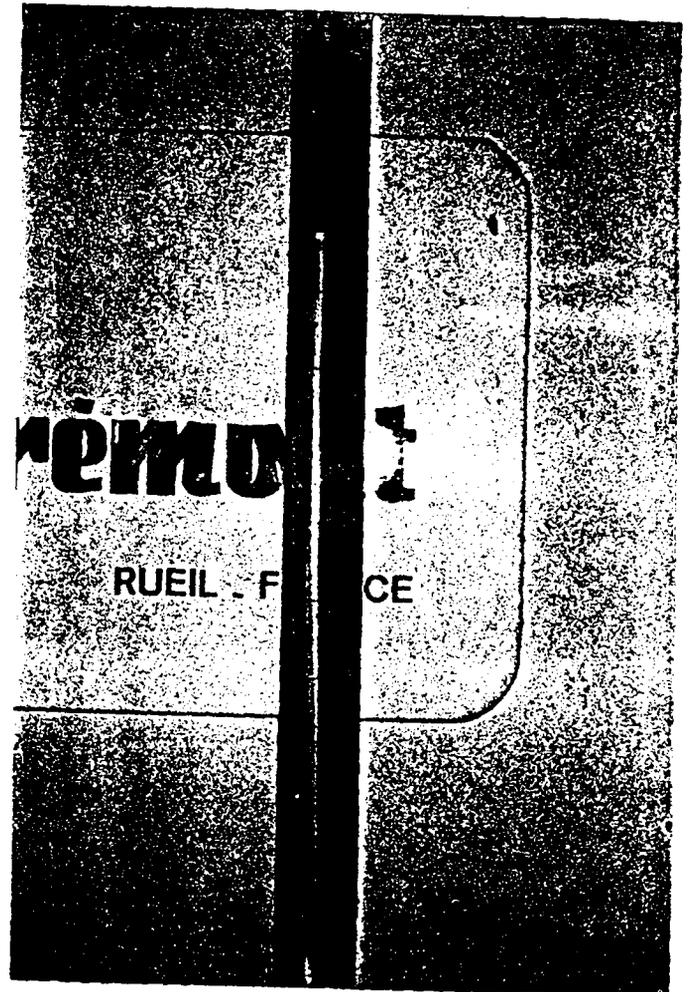
Ph. 5 : Collecteur de fraction  
(vue de dessus) et calculateur.  
CHESSY

Il était parfois difficile de mesurer la perte de charge sur les stations. Il n'y avait le plus souvent, qu'un piquage sur la canalisation d'eau filtrée. Un simple tube transparent placé sur le piquage a permis de lire directement en hauteur d'eau, la pression en sortie du filtre. Connaissant la hauteur de l'eau au-dessus du filtre, il est aisé d'en déduire la perte de charge.

Les photographies 6 et 7 montrent le dispositif de prise de lecture de pression.



Ph. 6 : Prise de pression  
sur la canalisation d'eau filtrée.  
CHESSY



Ph. 7 : Lecture de la pression  
en sortie de filtre  
(51 cm d'eau). CHESSY

Parfois, il n'y avait pas de possibilité de prélèvement et de mesure de pression, simultanément. Il fallait réaliser un piquage de fortune, et laisser la prise de pression en place, en permanence. Pour prélever les échantillons d'eau filtrée, la seule possibilité était de reprendre directement les eaux de sortie de filtre sur la canalisation, comme à ETAMPES (cf. Ph. 8).



Ph. 8 : Prélèvement d'eau filtrée à ETAMPES.



# CH III/ - INTERPRETATION

---

**I - BILANS PAR STATION**



L'étude s'est effectuée sur 10 cycles de filtration, dans 7 petites unités d'eau potable du bassin Seine-Normandie. Les trois premières stations choisies étaient situées dans la région parisienne; LAGNY et CHESSY (Seine et Marne), et ETAMPES (Essonne). Les quatre autres unités ont été suivies dans le département de la MANCHE, pendant la période estivale (du 5 au 22 juillet). Les tableaux de résultats globaux par stations sont présentés en annexe 3.

## 1 - USINE DE LAGNY

### 1.1 - Caractéristiques

La station d'eau potable de LAGNY est alimentée par un pompage exhaure de 250 m<sup>3</sup>/h dans la Marne. La fiche synthétique de la station en annexe I-1, rappelle les principales caractéristiques de dimensionnement des ouvrages. Certains points sont importants :

- Pompage exhaure : 250 m<sup>3</sup>/h
- Coagulation-floculation polychlorure d'aluminium (ou WAC) : 20 à 60 g/m<sup>3</sup>  
floculateur de : 100 m<sup>3</sup>
- Décantation : Volume 600 m<sup>3</sup>  
1 décanteur cylindroconique : Surface 175 m<sup>2</sup>  
à purge automatique  $\frac{Q}{S_h} = 1,4$  m/h
- Filtration : Surface unitaire 20 m<sup>2</sup>  
3 filtres ouverts à sable : Vitesse de filtration 4 m/h  
Lavage manuel par air (10 mn) et eau (10 mn) : profondeur du lit de sable : 1 m  
(consommation d'eau de lavage 130 m<sup>3</sup> par journée de marche granulométrie : 1,2 mm (3 %))
- Régulation de la filtration.  
Des compensateurs de colmatage du type NEYRPIC assurent un débit constant et un niveau amont constant sur le filtre quelle que soit la perte de charge créée par l'encrassement du sable.
- Indicateurs de lavage.  
La perte de charge maximale admissible par construction est de 2 m de colonne d'eau.



## 1.2 - Résultats et interprétation

A LAGNY, deux cycles de filtration ont été étudiés. Les tableaux I et II en annexe II-1 présentent les résultats des analyses de turbidité mesurées avec un turbidimètre HACH après chaque série de prélèvements. La fig. 25. ci-dessous, résume le premier cycle de filtration.

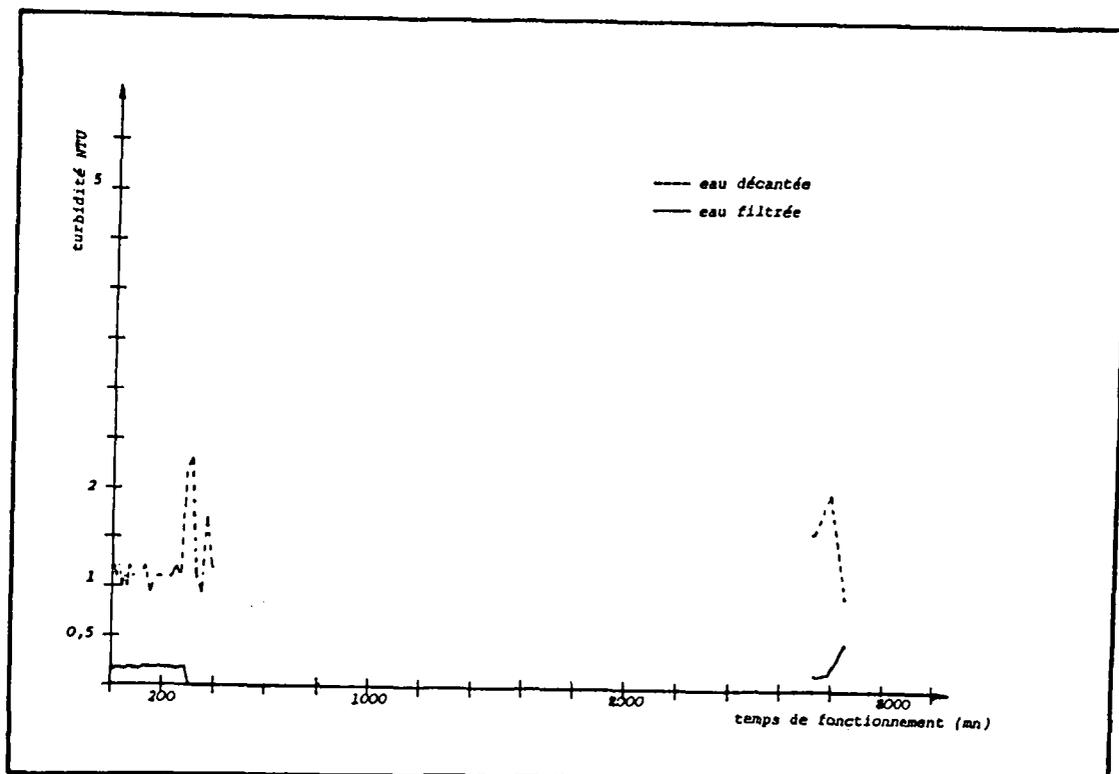


Fig. 25. : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée et de l'eau décantée à l'usine de LAGNY sur Marne, du mercredi 19 Juin 1985 à 14h50 au vendredi 21 Juin 14h (durée du cycle environ 47 h).

- Il apparaît que la turbidité de l'eau décantée varie quelque peu, elle se situe en-dessous de 1,5 NTU en moyenne, mais une pointe de turbidité (2,3 NTU) est observée au bout de 310 mn de fonctionnement, et une heure après. Ces pointes et toutes les micro-pointes observées peuvent provenir d'à-coups hydrauliques sur le décanteur par suite des purges automatiques.

Le floc remonterait en surface à ce moment-là et provoquerait ces variations de turbidité.

- La qualité de l'eau filtrée varie assez peu, il faut noter que cette qualité est plus médiocre pendant les premières 10 minutes de filtration qu'après, mais la différence est peu marquée. (cf. fig. 26.).

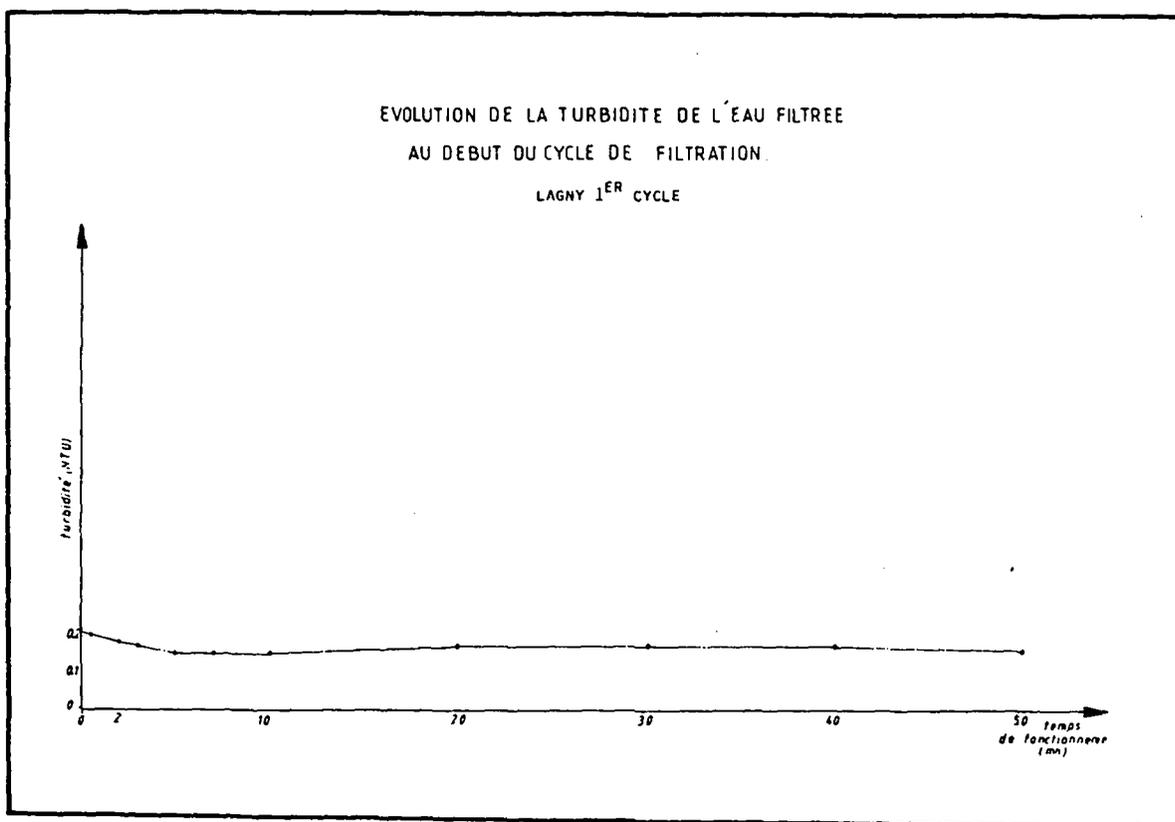


Fig. 26. : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée au début du cycle de filtration.

- Les prélèvements pour l'analyse de l'aluminium ont tous été négatifs. Le tableau ci-dessous montre que même au début du cycle, l'aluminium soluble ne se trouve pas en concentration importante dans l'eau filtrée. Il faut préciser que ce jour-là, le traitement au WAC était faible, le taux n'était que de  $20 \text{ g/m}^3$  ce qui correspond à une concentration en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de  $2 \text{ g/m}^3$  soit  $1 \text{ g/m}^3$  d'Al soluble.

Echantillon	Temps	pH	Température	Al (mg/l)
eau filtrée	3 mn	7,95	16°C	< 0,2
EF	10 mn	7,70	17°C	< 0,2
EF	30 mn	7,70	16°C	< 0,2
EF	50 mn	7,70	17°C	< 0,2
eau filtrée	1h50 mn	7,70	17°C	< 0,2
eau filtrée	25h30 mn	7,70	17°C	< 0,2
eau filtrée	47h30 mn	7,60	17°C	< 0,2
eau décantée	1h00	7,70	16°C	< 0,2

Tableau : Evolution du pH et de la concentration de l'eau filtrée en aluminium au cours d'un cycle de filtration.

LAGNY - Mercredi 19 Juin 1985.

La courbe de solubilité de l'aluminium (fig. 26 bis ci-après), montre qu'à un pH de 7,7, il ne peut effectivement pas y avoir plus de  $200 \mu\text{g/l}$  d'aluminium en solution.

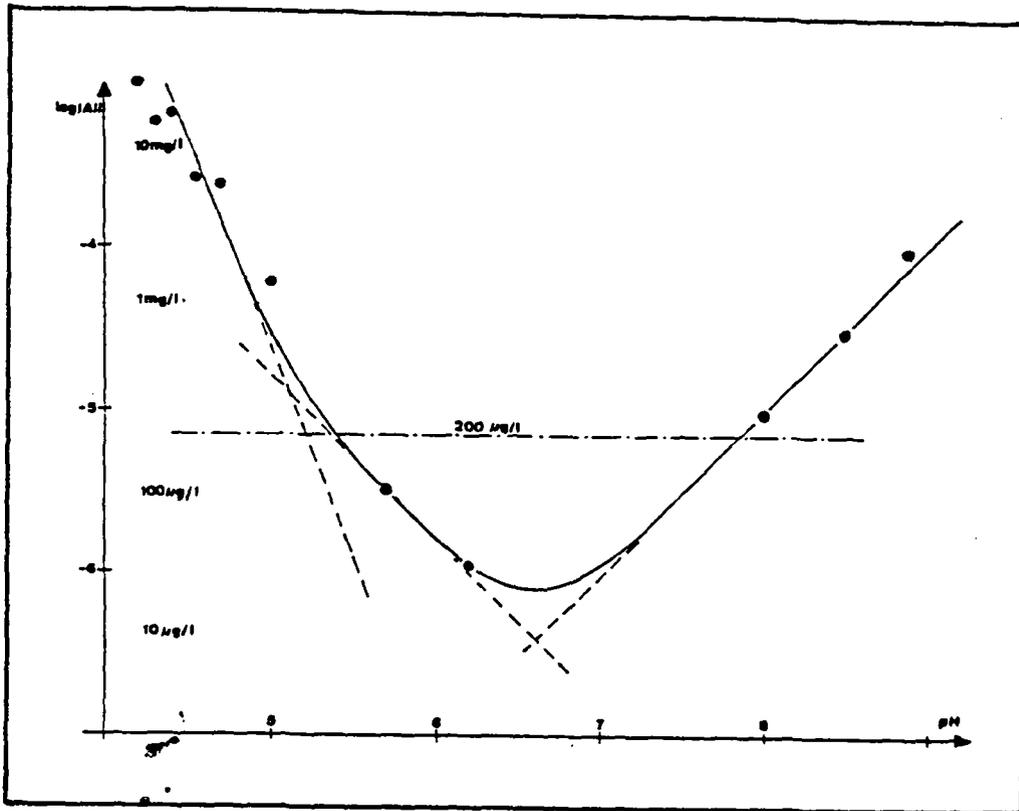


Fig. 26 bis : Solubilité de l'aluminium en fonction du pH dans l'eau distillée tamponnée d'après CLEMENT, SEUX et MOUSSA (5)).

- La Fig. 25. montre que la turbidité de l'eau filtrée augmente légèrement en fin de cycle, il aurait fallu continuer la filtration pour se rendre compte si cette augmentation correspond réellement à un percement du filtre. Il faut remarquer que le % d'abattement de la turbidité de l'eau décantée dans le filtre (cf. tableau I en annexe 3.1) est constant au cours du cycle de filtration :

le rapport  $\frac{\text{turbidité de l'eau décantée-TEF}}{\text{TED}} = 85 \%$

en moyenne avec un écart type de 2 % seulement. La seule valeur d'abattement médiocre observée est de 50 % en fin de cycle. Ce qui laisse à penser que la qualité de l'eau commence à décliner. L'étude de la perte de charge peut aider à conclure plus justement.

La Fig. 27. ci-dessous, montre que la perte de charge augmente de façon **linéaire** avec le temps à partir d'une valeur  $H_0 = 32$  cm pour le filtre propre, jusqu'à environ 1 m à  $t = 1900$  mn. A partir de cet instant, la perte de charge évolue de façon **semi-exponentielle** en fonction du temps. La courbe obtenue est semblable à celles observées en théorie (cf. Ch. I. § 2.2, IVES (1) et RICHARD (10)). Compte tenu de l'évolution finale de cette courbe (exponentielle), la perte de charge limite admissible ( $H_1 = 200$  cm) sera atteinte au bout de 3 000 mn. soit 50 h après le lavage du filtre.

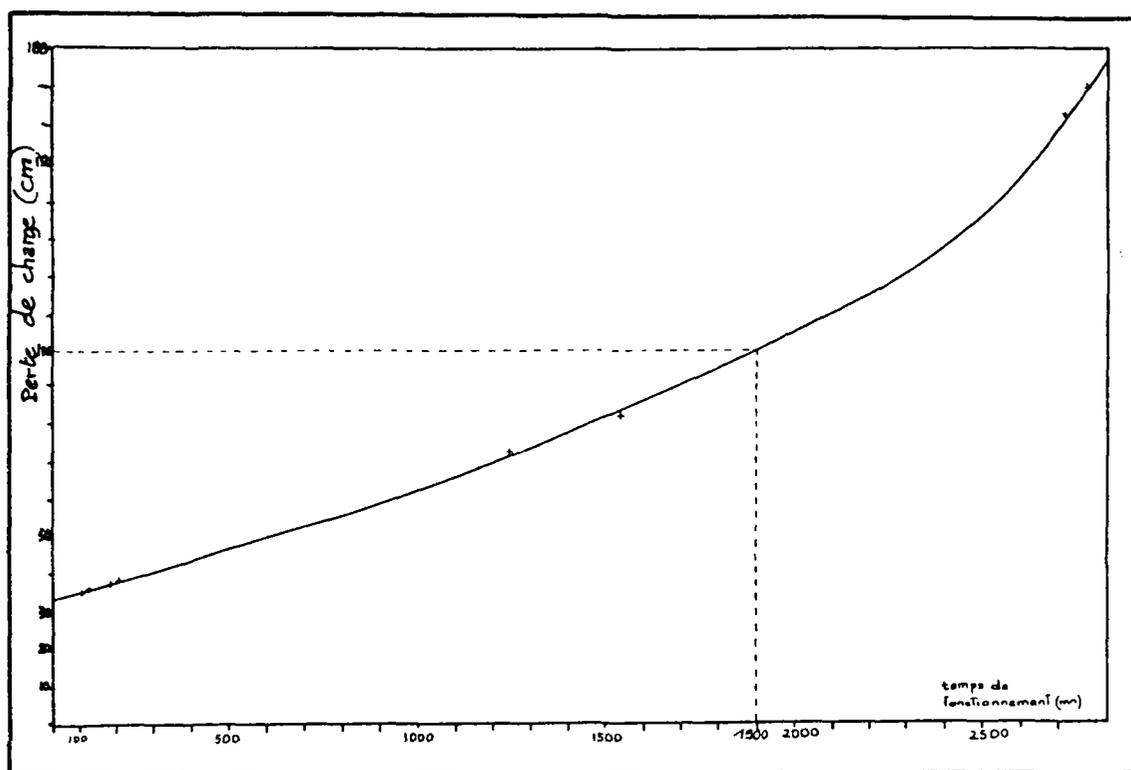


Fig. 27. : Evolution de la perte de charge au cours du temps.  
LAGNY 1er cycle de filtration.

La durée du premier cycle de filtration était de 47h30, au vu de l'évolution de la perte de charge, il est possible que le filtre ait commencé à percer au bout de ce temps. La valeur de turbidité mesurée (0,48 NTU) est sensiblement **trois fois plus** importante qu'en moyenne.

- Une première conclusion sur ce cycle est qu'il est conseillé de ne pas dépasser 170 cm de perte de charge, ce qui correspond à un temps de filtration d'environ 47 h et à un volume d'eau filtrée de 11250 m<sup>3</sup> pour les 3 filtres. Dans ces conditions, le filtre n° 2 de la station de LAGNY fonctionne bien.

- L'étude du second cycle de filtration à LAGNY (cf. tableau II en annexe II-1) permet de remarquer que la qualité du filtrat est effectivement médiocre en début de cycle. La fig. 28 ci-dessous tracée à la même échelle que la fig. 26 précédente, montre une nette différence de turbidité entre les 10 premières minutes de filtration et le reste du temps.

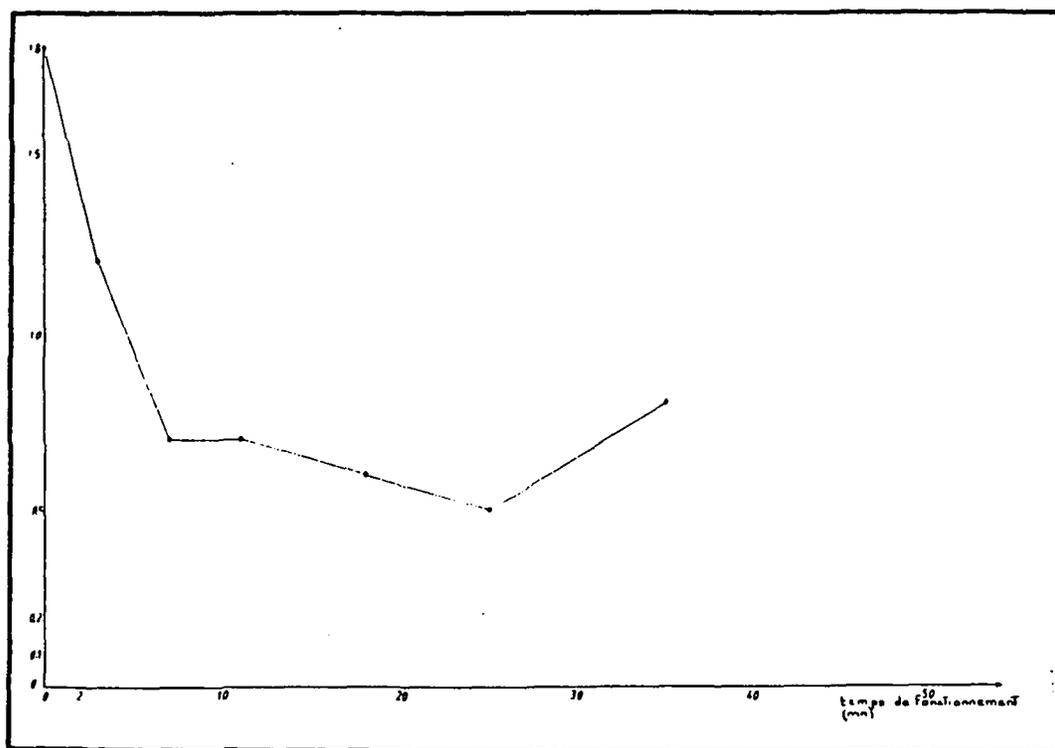


Fig. 28 : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée au cours du cycle de filtration.

Les analyses de l'aluminium montrent qu'une partie non négligeable d'aluminium soluble traverse le filtre au début du cycle.

Evolution de la teneur en aluminium et du pH au cours du 2ème cycle de filtration et du lavage.

ECHANTILLON	HEURE	pH	Al soluble (mg/l)
eau sur filtre	14h26	7,65	< 0,2
eau filtrée	14h58	7,70	0,58
eau de rinçage	14h57	7,80	0,57
eau de rinçage	14h43	7,85	8,0

Début du lavage à 14h27 - Fin du lavage à 14h52.

La cause du passage d'aluminium soluble dans l'eau filtrée juste après le lavage est multiple. Tout d'abord, le pH basique de l'eau de lavage (eau traitée) augmente le pH de l'eau sur le filtre, et l'aluminium complexé et précipité peut repartir en solution. D'autre part, les pores du filtre sont à ce moment là plus larges (le lit de sable a été aéré et fluidisé pendant le lavage), et des floccs d'aluminium peuvent passer à travers le filtre. Il semblerait que le filtre relargue l'aluminium qu'il a accumulé au cours du cycle précédent, puisque l'on trouve sur l'eau de rinçage, un taux de 8 mg/l d'aluminium, alors que le taux de traitement n'était que de 32 g/m<sup>3</sup> de WAC soit environ 1,6 mg/l d'aluminium soluble ce jour-là (cette valeur élevée de l'aluminium soluble peut provenir toutefois d'une erreur d'analyse ou d'échantillonnage).

- Le percement du filtre n'est pas très accentué, mais au bout de 34 H de filtration la qualité de l'eau filtrée semble décroître. La fig. 29. montre qu'à partir de cet instant, la turbidité dépasse le cap de 0,45 NTU, et l'abattement du filtre n'est plus important : il reste égal à 50 % en moyenne sur les 15 derniers prélèvements, alors qu'il était de 60 % auparavant. La diminution n'est pas spectaculaire, mais il faut préciser qu'un abattement de 60 % est médiocre. Le 1er cycle de filtration sur ce même filtre montrait un abattement de 85 %. Il apparaît donc qu'un des prétraitements était insuffisant ce jour-là. Le taux de WAC était peut-être trop important ce qui expliquerait en partie les grandes variations de turbidité observées sur l'eau décantée et filtrée, et les fuites en aluminium à travers le lit.

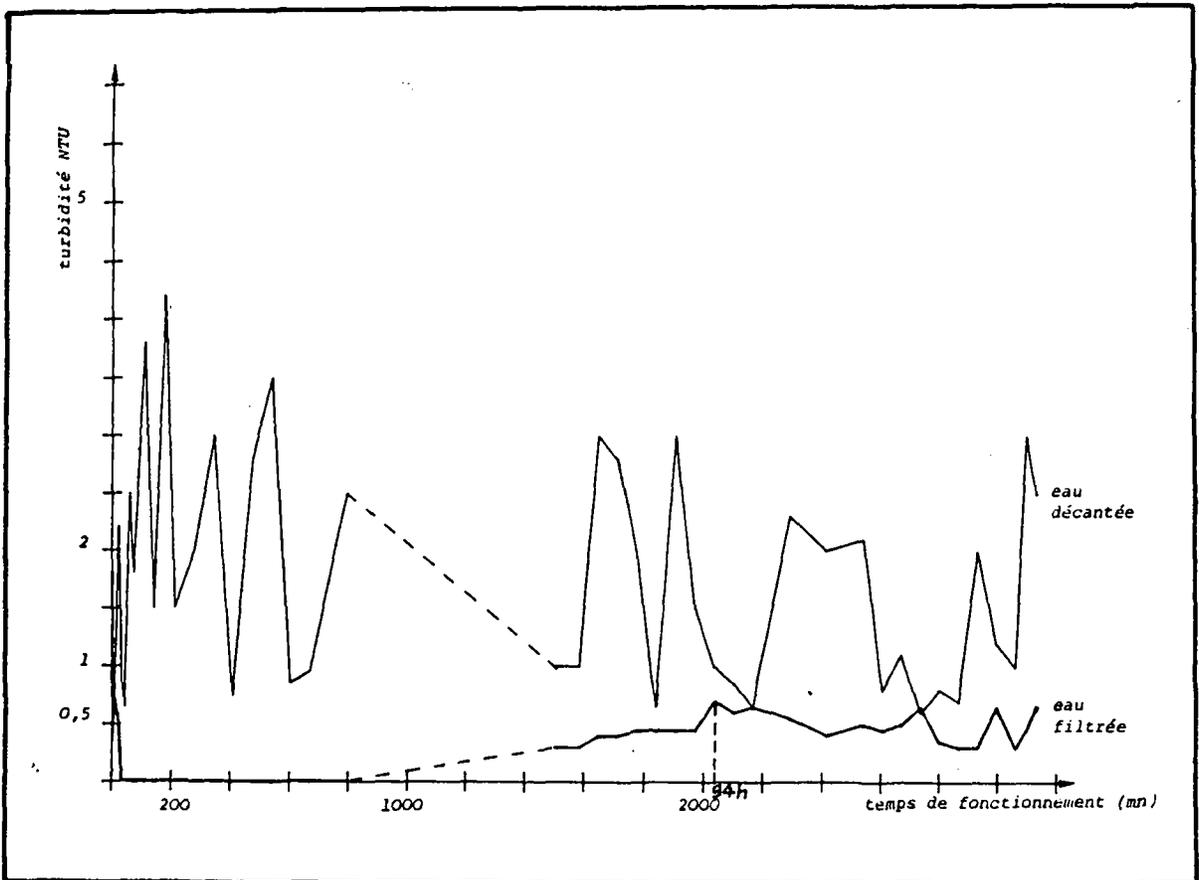


Fig. 29. Evolution de la turbidité de l'eau décantée et de l'eau filtrée au cours du temps. LAGNY, second cycle.

### 1.3 - Bilan

- La station de LAGNY-sur-Marne fonctionne apparemment bien, mais il est conseillé de ne pas dépasser 170 cm de perte de charge, ce qui correspond environ à 47 h de filtration, et à un volume d'eau filtrée par filtre de 3750 m<sup>3</sup>.

- La qualité de l'eau est médiocre pendant une dizaine de minutes après le lavage. Compte tenu des fuites en aluminium possibles (cf. 2ème cycle), il est vivement conseillé lorsque le traitement au WAC a été intensif (60 g/m<sup>3</sup>) au cours du cycle précédent, de rejeter l'eau filtrée pendant les 5 premières minutes qui suivent le lavage. Le volume à rejeter n'est pas important (3 lavages pour 2 jours de filtration correspondent à  $3 \times \frac{250}{60} \times 5 = 62,5$  m<sup>3</sup> / 2 j, soit environ une perte de 30 m<sup>3</sup> par jour, ce qui correspond à 0,7 % de la production). Le seul inconvénient de cette solution est que les stations ne sont pas équipées pour rejeter (dans les goulottes de lavage, par exemple), l'eau filtrée. Une autre solution serait d'ajouter à l'eau de rinçage en fin de lavage, un acide pour abaisser le pH de l'eau traitée vers 6,5 - 7 afin d'éviter de déstabiliser les floccs d'hydroxyde d'aluminium présents en grande quantité dans le filtre. Mais cette solution n'est pas, sans doute, plus économique que la première.

## 2 - USINE DE CHESSY

### 2.1 - Caractéristiques de la station

La fiche synthétique en annexe I-2 rappelle les principales caractéristiques de la station.

- Débit exhaure : 100 m<sup>3</sup>/h
- Coagulation : sulfate d'alumine : 50 g/m<sup>3</sup>  
Floculation
- Décantation : 2 décanteurs  
"Pulsator" surface : 20 m<sup>2</sup>  
unitaire
- purge automatique :  $\frac{Q}{Sh} = 2,5$  m/h
- Filtration : 2 filtres ouverts  
à sable

Lavage manuel par air et eau

- surface unitaire : 12 m<sup>2</sup>
- vitesse de filtration : 4 m/h
- profondeur du lit : 0,8 m
- granulométrie : 0,7 m

- Régulation de la filtration : compensateurs de colmatage de type Neyrpic.
- Indicateurs de lavage : couleur de l'eau traitée 10 Hazen.

## 2.2 - Résultats et interprétation

Les courbes de la fig. 30. ci-après montrent qu'après 8h30 de filtration, la turbidité de l'eau filtrée augmente brusquement et reste supérieure à 0,75 NTU jusqu'à la fin du cycle. La forme des courbes laisserait supposer que la turbidité de l'eau filtrée varie en fonction de celle de l'eau décantée.

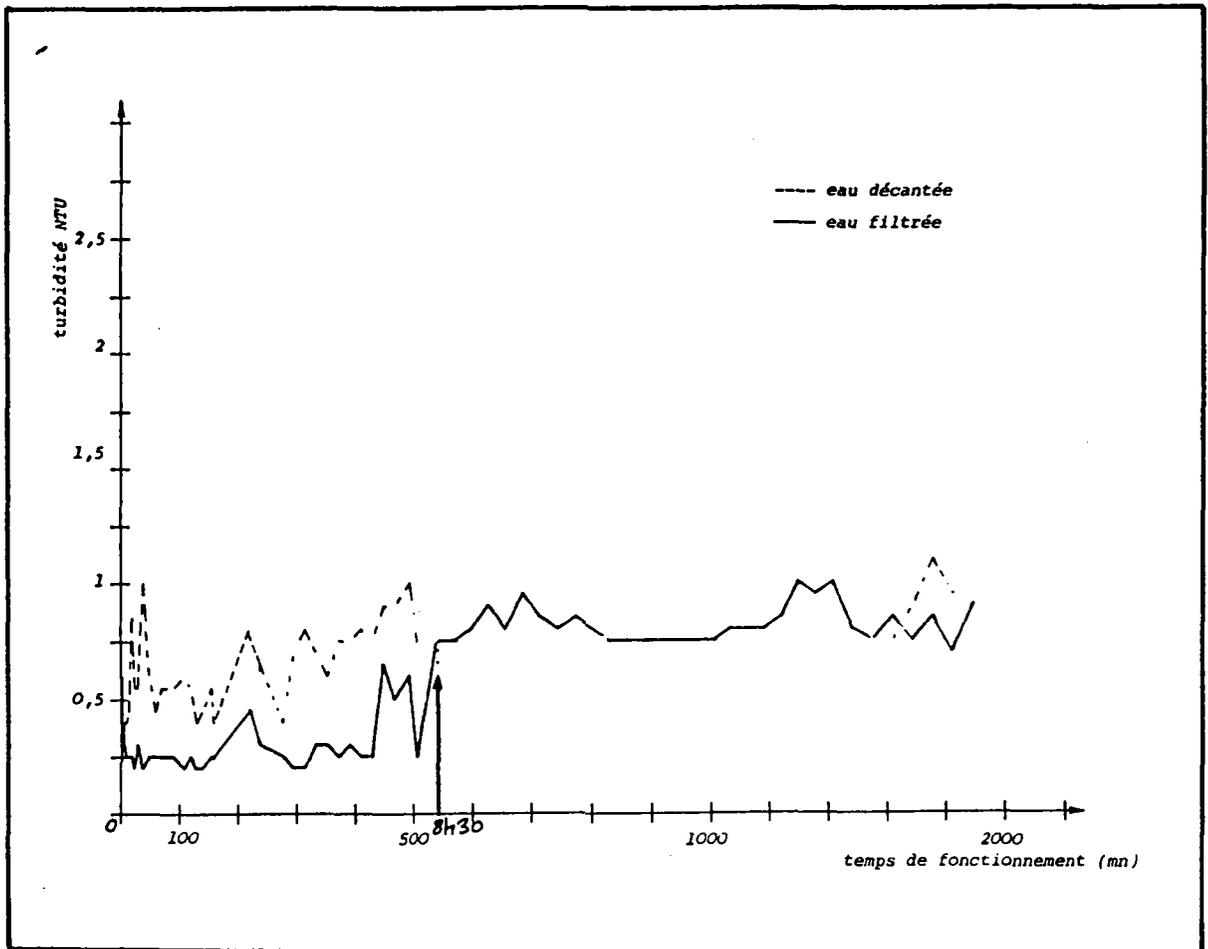


Fig. 30. Evolution de la turbidité de l'eau décantée et de l'eau filtrée au cours du 1er cycle de filtration à CHESY.

D'après KAWAMURA (2), il existe une relation linéaire entre la turbidité de l'eau décantée et celle de l'eau filtrée. La fig. 31. le montre :

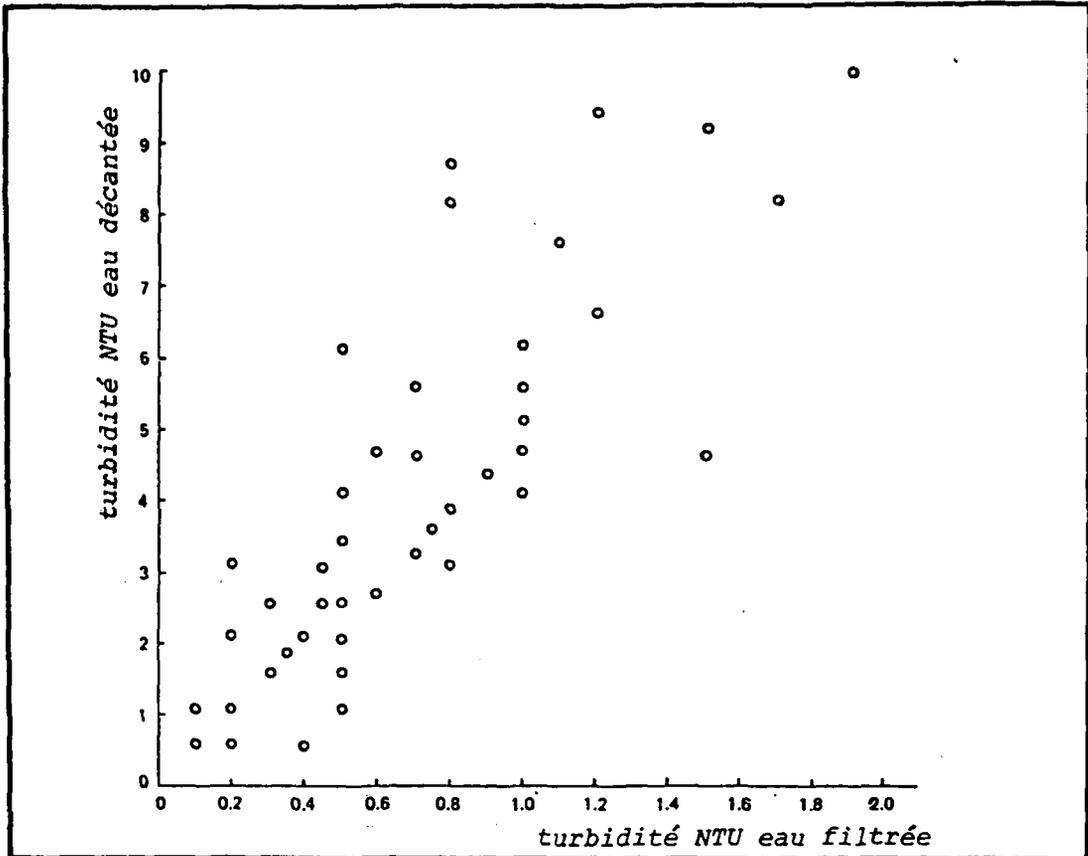


Fig. 31. Relation entre la turbidité de l'eau décantée et de l'eau filtrée (d'après KAWAMURA (2)).

Cependant, cela n'apparaît pas sur la fig. 32., tout du moins au début du cycle (de 0 à 300 mn). Par contre, en fin de cycle (de 400 à 1400 mn) une relation apparaît entre turbidités de l'eau filtrée et de l'eau décantée. Pour KAWAMURA (2), il faut absolument maintenir une turbidité de moins de 3 FTU sur l'eau décantée, sans quoi le filtre n'est plus efficace.

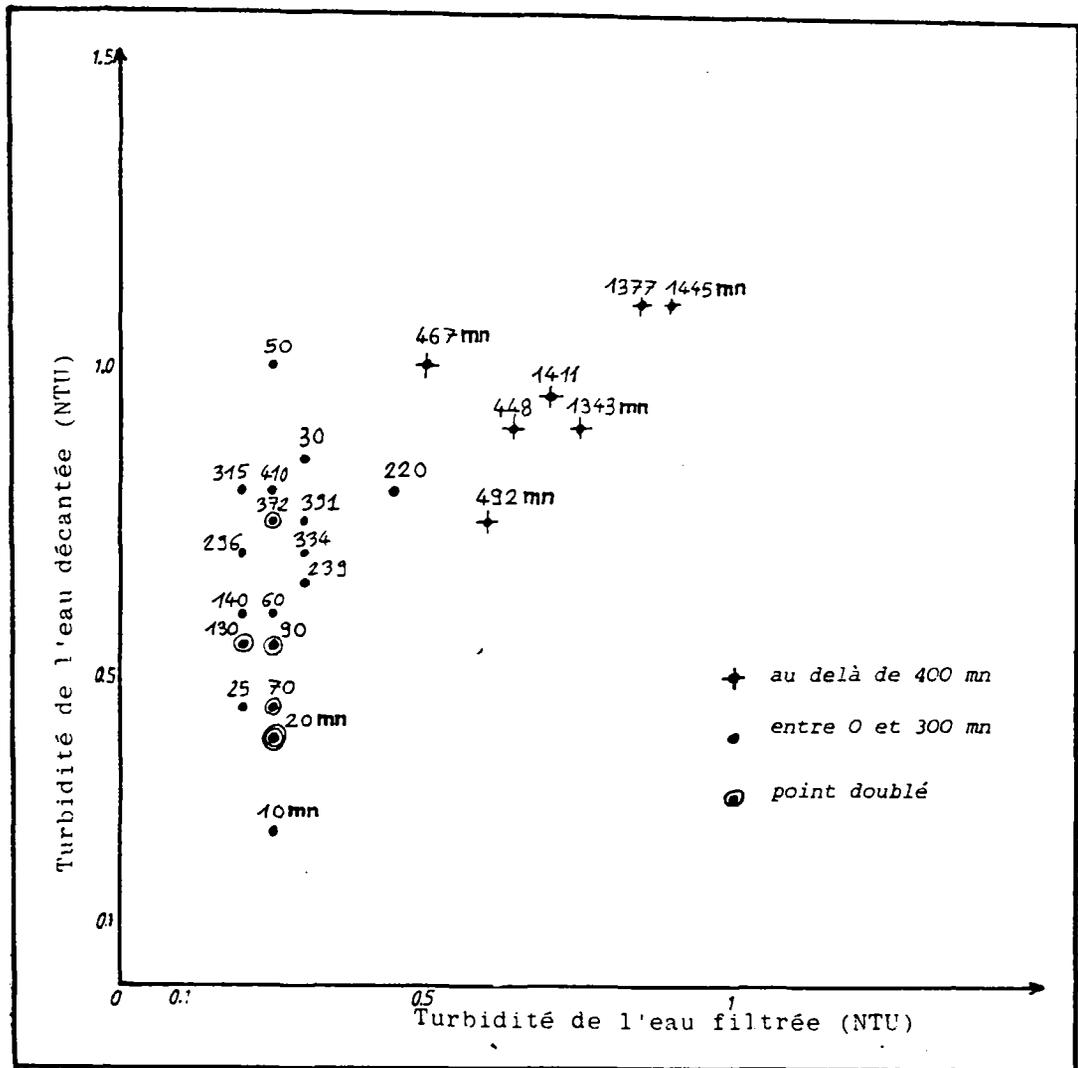


Fig. 32. Relation entre la turbidité de l'eau filtrée et de l'eau décantée au cours d'un cycle de filtration. CHESSY 1er cycle.

Le pourcentage d'abattement du filtre sur l'eau décantée (cf. tableau III en annexe II) en fin de cycle n'est que de 20 pour cent en moyenne. Ce qui signifie qu'une eau décantée de turbidité 5 NTU se retrouverait à une turbidité de 4 NTU après avoir traversé le filtre. Il faut donc effectivement abattre au maximum la turbidité de l'eau décantée, par un prétraitement approprié. Il est difficile d'agir sur le filtre qui apparemment est inadapté aux besoins de la station. En effet, il est lavé toutes les 24 h, alors que la perte de charge est peu importante (10 cm d'eau), et pourtant la qualité de l'eau se détériore dès 8 h de filtration. Une explication plausible est que le colmatage ne s'effectue qu'en surface du filtre, tant que les 10 premiers centimètres du lit de sable ne sont pas colmatés, la capacité "épuration" du filtre intervient (abattement de 60 % en moyenne).



- Pas de décanteur
- Filtration 3 filtres ouverts à sable 

}	profondeur	: 0,80 m
	granulométrie	: 0,9mm
	surface unitaire	: 20 m <sup>2</sup>
	vitesse de filtration	: 5 m/h

Lavage manuel par air (10 mn)  
et eau (10 mn).

- Régulation de la filtration débit amont constant et hauteur d'eau constante sur le filtre grâce à un compensateur de colmatage de type Neyrpic.
- Indicateurs de lavage : perte de charge maximale admissible : 1,50 m

### 3.2 - Résultats - Interprétation

Le tableau V en annexe II-3 représente l'évolution de la turbidité des eaux filtrées et décantées au cours d'un cycle de filtration. Les courbes ci-dessous fig. 33 résument les données :

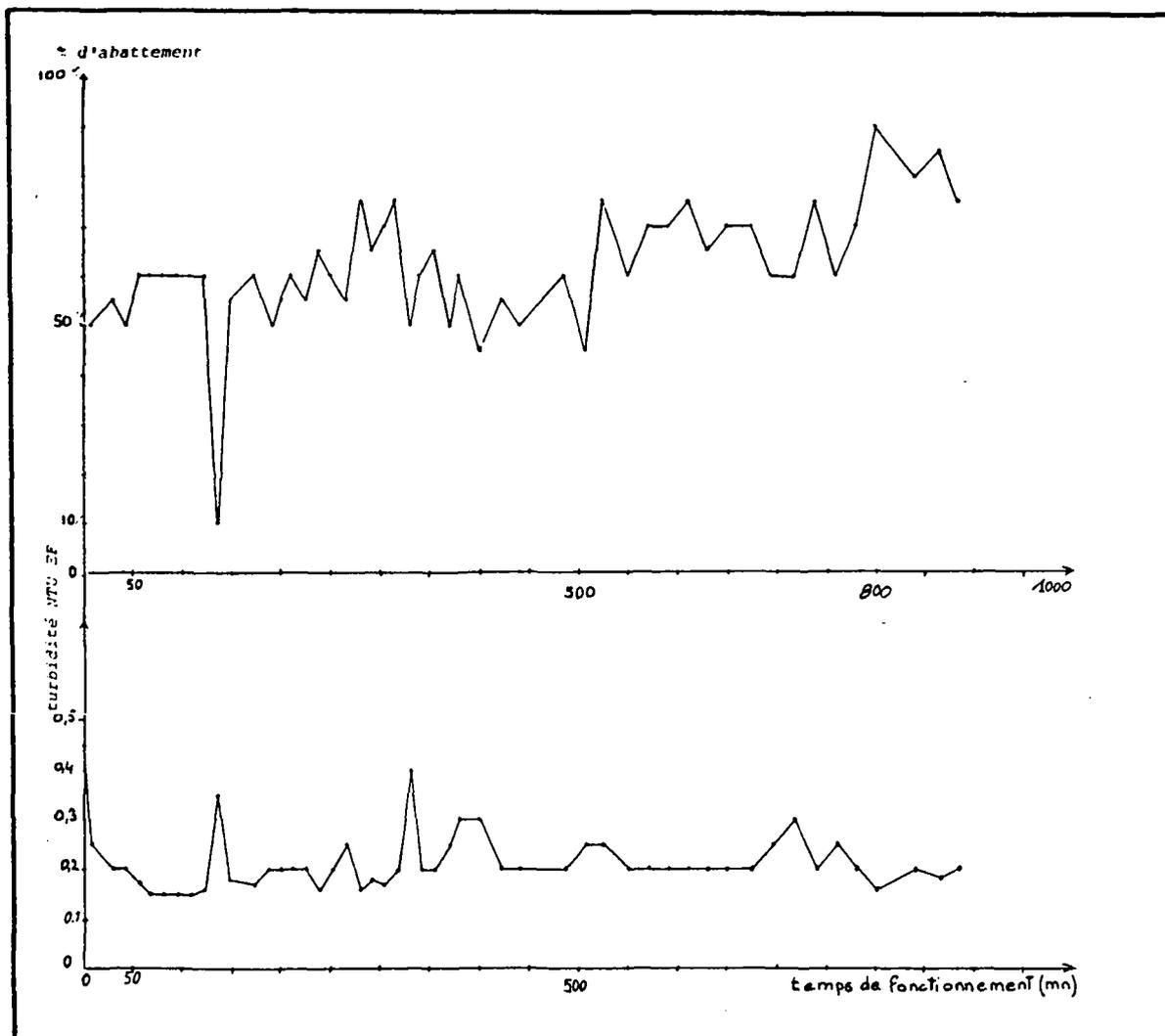


Fig. 33. Evolution de la turbidité et du % d'abattement de l'eau filtrée au cours du 1er cycle de filtration à ETAMPES.

La turbidité de l'eau filtrée est à peu près constante. Les seules pointes observées correspondent à des redémarrages de pompes. La qualité de l'eau décantée est assez bonne, la courbe d'abattement augmente sensiblement avec le temps, et en moyenne l'abattement est supérieur à 60 %. De plus, l'absence de décanteur se fait peu sentir, la turbidité de l'eau filtrée varie avec un écart-type d'environ 10 % seulement. Cela provient du fait que le jour des analyses, la rivière La Louette (issue de nombreuses sources) était très limpide, et la coagulation-floculation était bien adaptée aux besoins. Il faut noter à ce titre, que depuis l'utilisation de silicate comme adjuvant de coagulation, la qualité de l'eau filtrée est bien meilleure. La société fermière (S.L.E.E.) s'était aperçue que des particules très fines traversaient le filtre en hiver, ils ont donc décidé de changer d'adjuvant de coagulation, et de remplacer l'aqualgine par du silicate. Depuis le filtre fonctionne mieux, mais la durée du cycle de filtration est raccourcie. Les courbes de perte de charge (fig. 34), montrent que la perte de charge limite admissible ( $H_l = 150$  cm d'eau) est atteinte à  $t_1 = 900$  mn, (1er cycle) et à  $t_1' = 1050$  mn (2ème cycle).

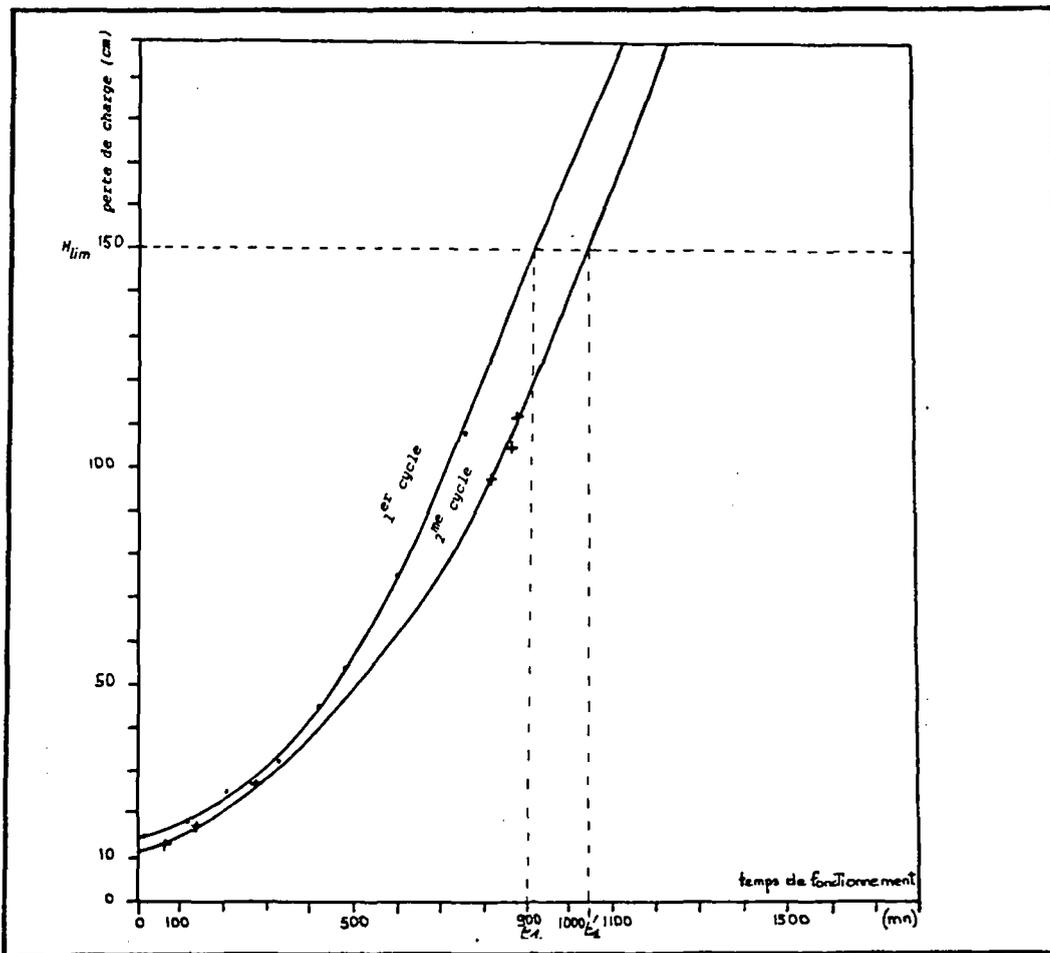


Fig. 34. : Evolution de la perte de charge en fonction du temps, au cours des deux cycles de filtration à ETAMPES.

A la fin du premier cycle, la qualité de l'eau filtrée et le rendement d'épuration étaient excellents. Le temps  $t_1$  n'était pas encore atteint. Par contre, le tableau VI en annexe II-3 montre que l'abattement chute d'environ 70 % de moyenne à 45 % après la 1100<sup>ème</sup> minute de filtration ; et la turbidité de l'eau filtrée est pratiquement doublée. La (fig. 34) montre que le temps limite  $t_1$  est effectivement dépassé, le filtre commence à percer.

### 3.3 - Bilan

Peu de choses sont à signaler sur la station d'ETAMPES, une bonne coagulation-floculation permet de pallier l'absence de décanteur. L'eau filtrée est de bonne qualité, mais il est conseillé de ne pas dépasser la perte de charge limite admissible ( $H_l = 150$  cm) qui correspond à environ 18 heures de filtration à temps plein, pour une turbidité de l'eau filtrée moyenne de 0,35 NTU (turbidimètre HACH).

## 4 - STATION DE ST-AUBIN-LES-PREAUX (GRANVILLE, MANCHE)

### 4.1 - Caractéristiques de l'usine

- Pompage exhaure : arrivée gravitaire :  $300 \text{ m}^3$   
Production estivale :  $500 \text{ m}^3/\text{j}$
- Coagulation : sulfate d'alumine :  $14 \text{ à } 60 \text{ g/m}^3$
- Floculation : addition de lait de chaux  
au niveau du décanteur en  
cas d'ajustement du pH de  
floculation :  $2 \text{ à } 6 \text{ g/m}^3$
- Décantation : 1 décanteur cylindro-conique Surface  $200 \text{ m}^3$   
type C.E.O.  $\frac{Q}{Sh} = 1,4 \text{ m/h}$   
purge manuelle
- Filtration : 4 filtres ouverts à sable Surface unitaire  $20 \text{ m}^2$   
Lavage manuel par air (10 mn) et eau Vitesse de filtration  
(10 mn)  $3,5 \text{ m/h}$   
Granulométrie : 1,3 mn
- Régulation de la filtration  
Régulation à niveau aval constant. Le débit  
d'eau filtrée est maintenu constant au cours  
du temps par un dispositif à air.
- Indicateurs de lavage :  
Lavage lorsque la perte de charge atteint 90 à 120 cm d'eau.

#### 4.2 - Résultats - Interprétation

- Le tableau VII en annexe 11-4 représente l'évolution de la turbidité des eaux filtrées et décantées, au cours d'un cycle de filtration de 45 h.

- A première vue, le filtre fonctionne bien, l'abattement est de 72 % en moyenne. L'écart-type entre les % d'abattement est de 15 %. Les variations observées sont surtout dues à l'eau décantée, comme le montre le nuage de points de la fig. 35 ci-après.

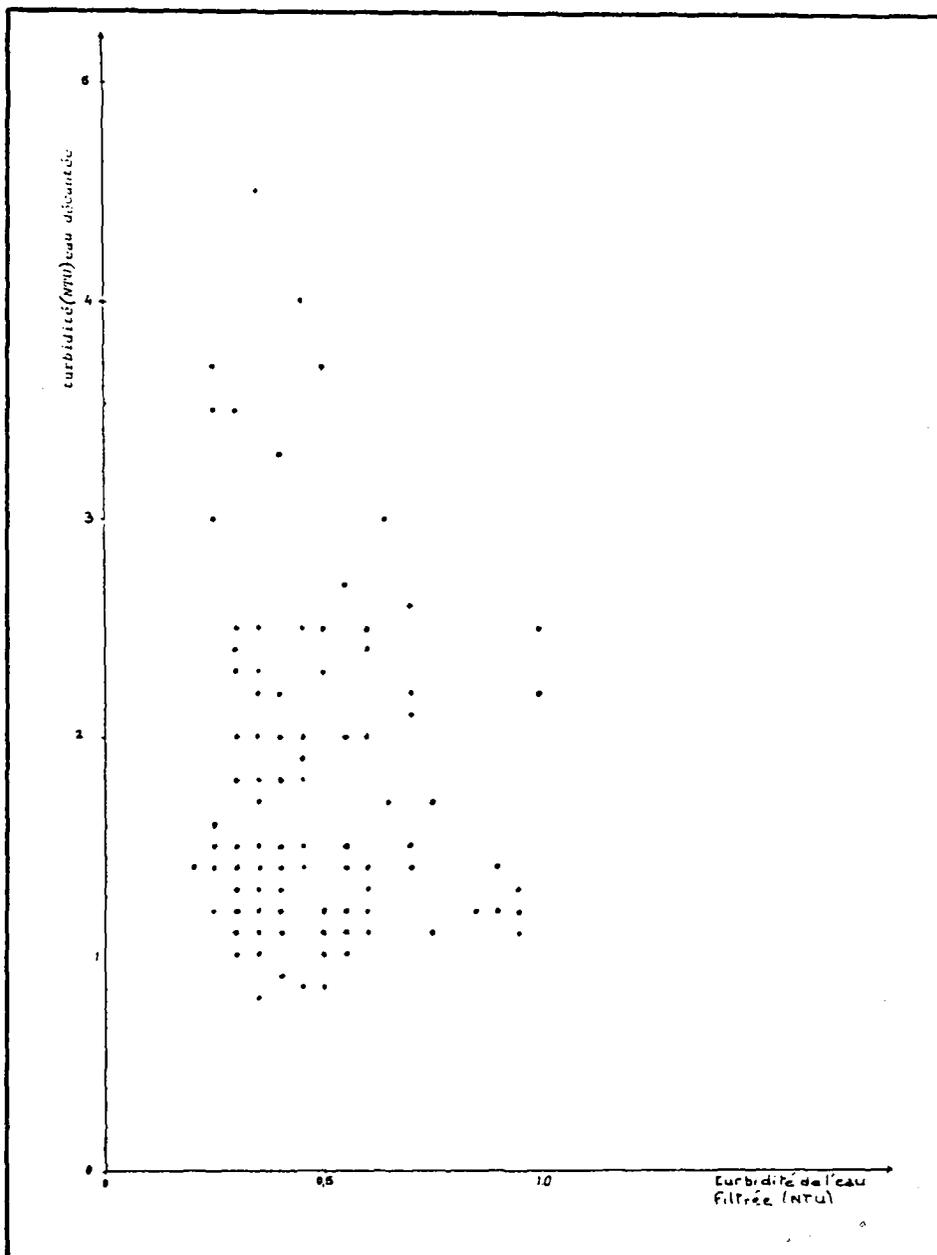


Fig. 35. : Relation entre la turbidité de l'eau décantée et de l'eau filtrée à ST-AUBIN.

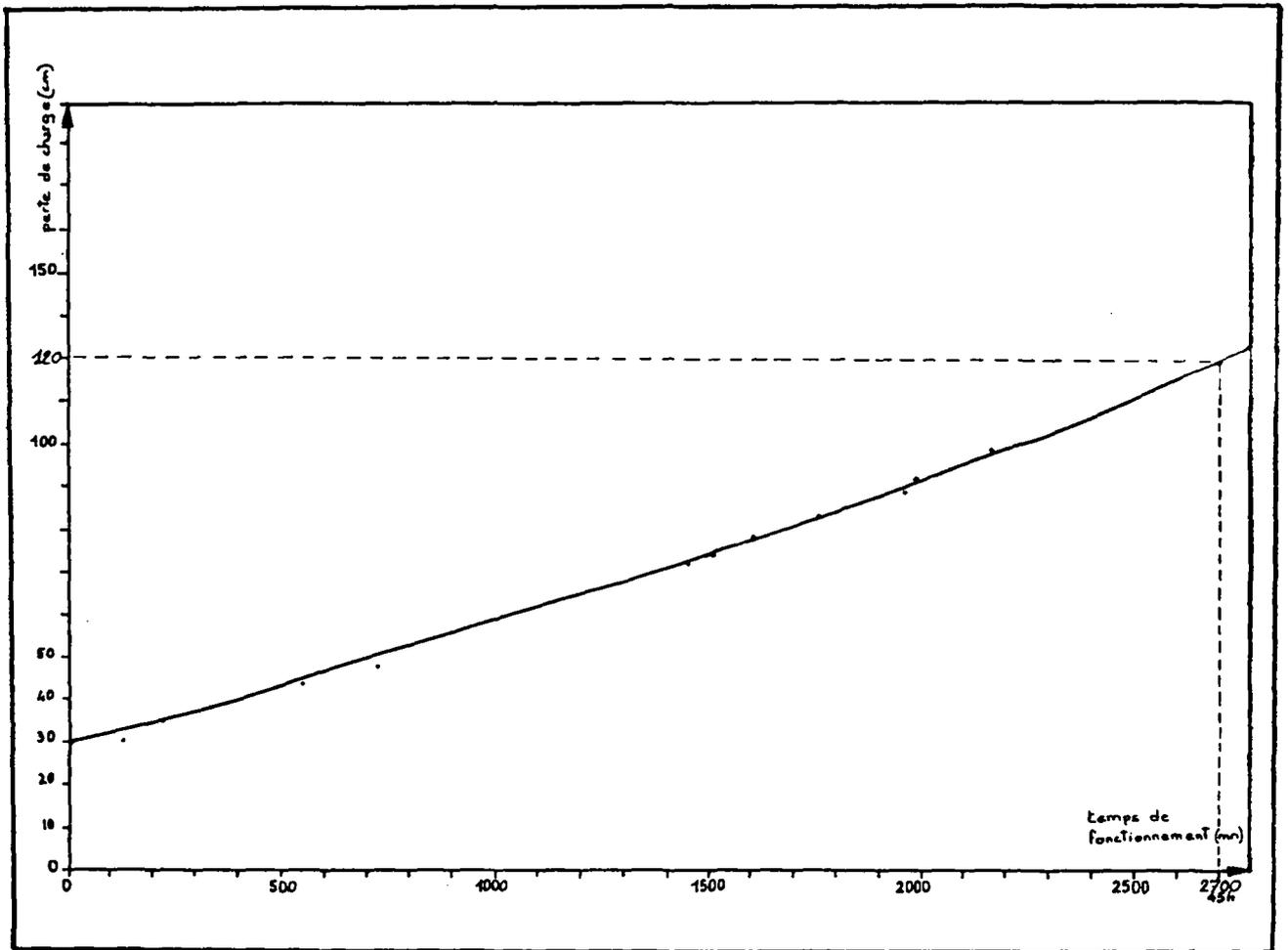


Fig. 36. : Evolution de la perte de charge en fonction du temps à ST-AUBIN.

La relation décrite par KAWAMURA (2) entre la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée est peu visible sur cette figure. Il semble que le filtre atténue les pics de turbidité de l'eau décantée.

- La courbe de perte de charge (fig. 36) évolue dans le même sens, il n'y a pas d'augmentation exponentielle de la perte de charge. Le modèle diffère de celui de DEGREMONT (7), et se rapproche beaucoup de celui d'IVES (cf. § 1.2.2).

$$H = H_0 + kt \text{ avec } k \text{ constante}$$

Cela signifie que le colmatage  $\sigma$  est une fonction linéaire du temps ( $\sigma = at$ ), le colmatage est bien homogène, aucune couche n'est entièrement colmatée. Le filtre fonctionne parfaitement dans toute sa masse.

- Il faut remarquer que certaines valeurs de turbidité sont anormalement plus élevées que la moyenne, et cela apparemment sans raison. En comparant les temps de marche et d'arrêt des pompes d'eau filtrée avec ces valeurs, il apparaît une relation entre l'augmentation de la turbidité de l'eau filtrée, et la mise en route des pompes. L'ouverture de la vanne d'eau filtrée, se faisant automatiquement et très lentement, l'hypothèse d'un à-coup hydraulique est à rejeter. Par contre, le démarrage des pompes après un arrêt peut créer un appel d'eau dans la partie basse du filtre et des particules peuvent être entraînées par cette onde de dépression.

- Certains prélèvements ont fait l'objet d'un comptage particulière (cf. tableau I en annexe III-1). Le minimum d'efficacité de rétention pour des particules de 1 à 2  $\mu\text{m}$  mis en évidence par YAO cité par IVES (4) est remarquablement observé. La moitié du nombre total des particules a un diamètre compris entre 1 et 2  $\mu\text{m}$ . Ce nombre de "fines" traversant le filtre décroît au cours du temps : en effet à  $t = 616$  mn, il est de 70 % du nombre total de particule, alors qu'il décroît à 66 % à  $t = 778$  mn, et à 42 % à  $t = 1762$  mn. La théorie moderne de la filtration l'explique facilement par le fait qu'une particule déposée sur un grain joue ensuite le rôle de collecteur. Plus les grains se colmatent, plus les particules sont fixées.

Etant donné que les échantillons étudiés étaient tous anormalement turbides, il apparaît que cette hausse de turbidité sur l'eau filtrée est due en grande partie aux particules de 1 à 2  $\mu\text{m}$ .

- Pour apprécier la capacité épuratoire du filtre, des analyses de Carbone Organique Total (C.O.T.) ont été effectuées sur quelques échantillons sélectionnés :

Temps de fonctionnement (mn)	C.O.T. (mg/l)		% d'abattement % $\frac{ED-EF}{ED}$
	ED	EF	
778 mn	1,507	0,819	45 %
1084 mn	2,018	1,111	45 %
1888 mn	3,911	1,718	55 %

C.O.T. : Carbone Organique Total

$$\% \text{ d'abattement} = \frac{\text{C.O.T. Eau décantée} - \text{C.O.T. Eau filtrée}}{\text{C.O.T. Eau filtrée}}$$

Il apparaît nettement que le filtre a un mauvais rendement épuratoire. Les filtres à sable ne retiennent qu'à moitié (abattement de 50 % environ) les matières organiques.

- Il était intéressant d'analyser la concentration en aluminium sur l'eau filtrée, au cours d'un cycle de filtration.



11/11/11

#### 4.3 - Bilan

- Le colmatage du filtre s'effectue de façon graduelle dans toute la profondeur du lit. La perte de charge n'évolue pas encore vers le modèle exponentiel même après 45 h de filtration (environ 10 000 m<sup>3</sup> d'eau filtrée). Il est tout à fait possible de prolonger la durée du cycle, compte tenu du fait que la turbidité de l'eau filtrée reste inchangée même en fin de cycle. La courbe de ~~perce~~ de charge (cf. fig. 36) montre qu'il est possible de prolonger la durée du cycle à 58 h, ce qui correspond à une perte de charge de 150 cm d'eau.

- La qualité de l'eau filtrée est dans l'ensemble bonne, les pics de turbidité observés après le démarrage des pompes correspondent à un passage plus important d'aluminium en solution. Cependant, ces valeurs sont faibles et tout à fait acceptables.

- Le bon fonctionnement général de la station semble provenir d'une bonne maîtrise de l'étape de coagulation-floculation, d'une part, et d'un volume de décantation important (décanteur dimensionné pour la période estivale) qui atténue les variations de l'eau brute, d'autre part.

### 5 - DONVILLE (GRANVILLE - MANCHE)

#### 5.1 - Caractéristiques

- Pompage exhaure : 85 m<sup>3</sup>/h  
(Rivière le Bosq)
- Coagulation-floculation : Sulfate d'alumine 14 à 60 m<sup>3</sup>
- Décantation : Surface : 110 m<sup>2</sup>  
1 décanteur cylindrique conique  
purge automatique  $\frac{Q}{S_h} = 0,7$  m/h
- Filtration : Surface unitaire : 14 m<sup>2</sup>  
2 filtres ouverts à sable  
Particularité : lit de sable neuf  
Vitesse de filtration : 3 m/h  
Granulométrie : 1,2 mm
- Régulation de la filtration  
compensateur de colmatage  
type Neyrpic.

## 5.2 - Résultats - Interprétation

La particularité de la station de Donville est que le lit de sable est partiellement neuf, le dessus du lit (environ 30 à 40 cm a été rechargé juste avant les essais de filtration).

- La courbe de perte de charge (fig. 37) suit le modèle théorique linéaire pendant les 43 premières heures de filtration puis s'élève brusquement en exponentielle.

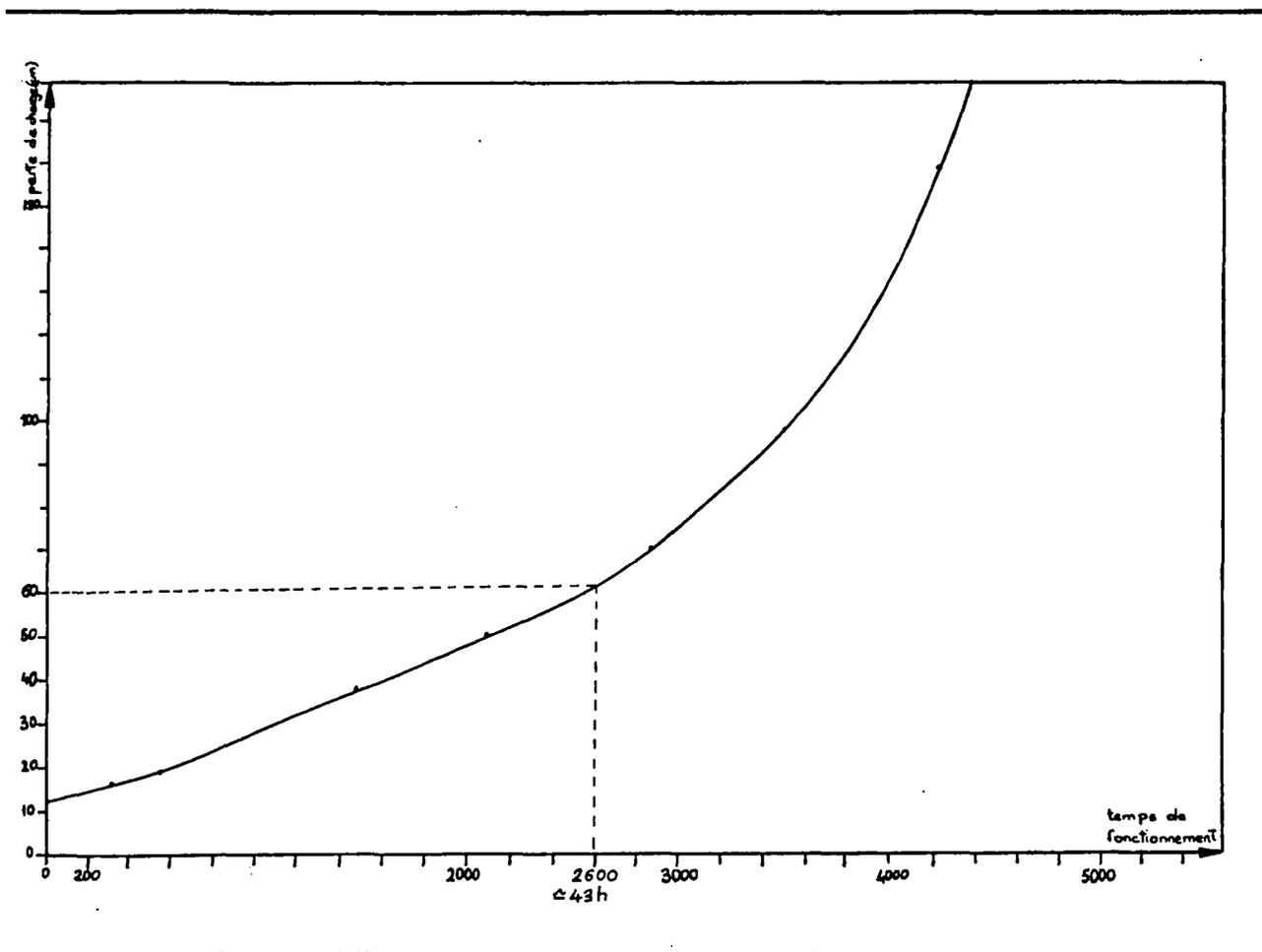


Fig. 37. : Evolution de la perte de charge en fonction du temps à DONVILLE.

Le tableau VIII en annexe II-5 résumé dans la courbe ci-dessous, montre que la qualité de l'eau suit à peu près le même cheminement (cf. fig. 38).

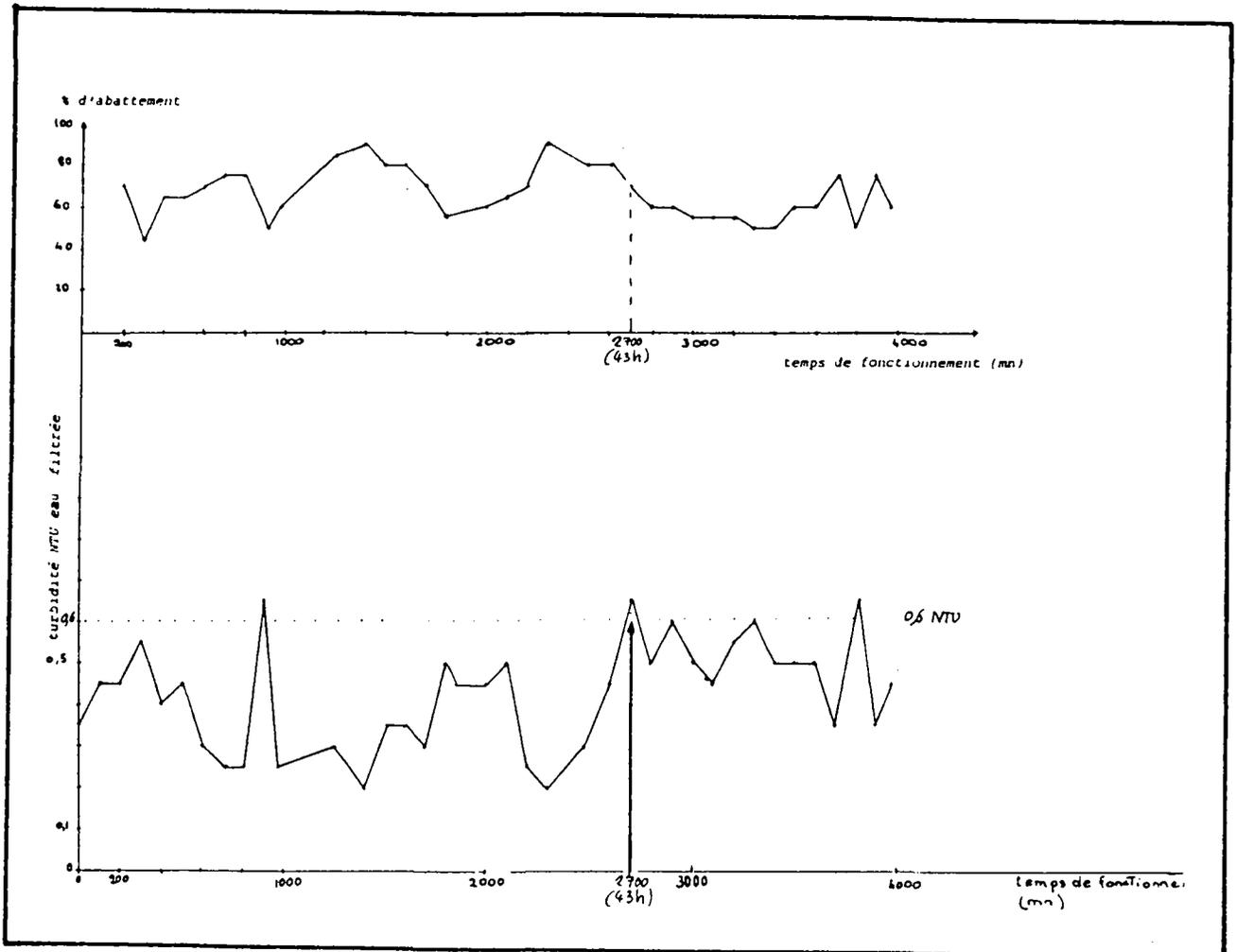


Fig. 38. : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée et du pourcentage d'abattement en fonction du temps à DONVILLE.

Le pourcentage d'abattement du filtre est sensiblement constant à 72 % en moyenne (écart-type 15 %) pendant 2700 mn (environ 43 h). Puis brusquement, l'abattement diminue à 55 % (écart-type de 10 %), cette chute correspond dans le temps au changement de pente de la courbe de perte de charge. Cependant, la qualité de l'eau filtrée est encore bonne, la turbidité reste inférieure à 0,60 NTU en moyenne.

Cette qualité sur un lit de sable propre est assez inattendue, mais elle s'explique par l'excellente qualité de l'eau décantée (moyenne de 1,3 NTU avec un écart-type de 10 % seulement).

- Les analyses de l'aluminium (cf. tableau ci-dessous) effectuées sur des échantillons prélevés au cours du cycle de filtration, sont en accord avec les remarques précédentes\*.

Tableau : Solubilité de l'aluminium dans l'eau filtrée au cours d'un cycle de filtration.

Temps de fonctionnement (mn)	Al soluble ( $\mu\text{g/l}$ )
1	36
2	61
5	30
10	51
15	58
30	67
120 (2 h)	59
390 (6h30)	42
1460 (24 h)	70
2040 (34 h)	29
2880 (48 h)	101
3480 (58 h)	78
4320 (72 h)	86

Eau décantée : 162  $\mu\text{g/l}$

\* La concentration en aluminium est plus importante en fin de cycle, à partir de la 48ème heure.

### 5.3 - Bilan

- La qualité de l'eau filtrée est très correcte compte tenu du fait que le lit de sable est pratiquement neuf.
- Il est possible d'augmenter la durée du cycle de deux à trois jours, mais il faut pouvoir s'assurer de la qualité de l'eau décantée.
- Les phases de coagulation-floculation, et de décantation sont excellentes ce qui au vu des résultats pour la station précédente laisse suggérer que les décanteurs cylindro-coniques de grande dimension sont une solution, peut-être peu économique à l'investissement, mais combien efficace (lorsque la phase de floculation est bien menée).

## 6 - GUEHEBERT (COUTANCES, MANCHE)

### 6.1 - Caractéristiques

- Débit d'exhaure :  $35 \text{ m}^3/\text{h}$   
(rivière La Vanne)
- Production moyenne :  $650 \text{ m}^3/\text{j}$
- Coagulation : sulfate d'alumine :  $30 \text{ à } 50 \text{ g/m}^2$   
floculation
- Décantation :  
1 décanteur type "circulator" : Surface :  $28 \text{ m}^2$   
purge automatique  $\frac{Q}{S_h} = 1,25 \text{ m/h}$
- Filtration  
1 filtre "ouvert" à sable : Surface :  $10 \text{ m}^2$   
lavage manuel par air et eau vitesse de filtration :  $3,5 \text{ m/h}$
- Régulation de la filtration Granulométrie :  $0,9 \text{ mm}$   
Compensateurs de colmatage  
type Neyrpic
- Indicateurs de colmatage :  
lavage tous les matins.  
(le manomètre fonctionne approximativement).

## 6.2 - Résultats - Interprétation

Le tableau IX en annexe II-6, montre que le pourcentage d'abattement de la turbidité de l'eau décantée par le filtre, n'est que de 17 % en moyenne (avec un écart-type de 16 %). Cela signifie que le filtre ne joue pratiquement pas son rôle de rétention des matières en suspension. L'effet du filtre est inexistant, tout au long du cycle de filtration. Les courbes ci-dessous (fig. 39) amènent plusieurs conclusions :

- Le filtre est inefficace du début à la fin du cycle, et ce quelle que soit la qualité de l'eau décantée. En effet, jusqu'à la sixième heure environ, la turbidité de l'eau décantée est relativement peu élevée (1,5 NTU en moyenne) tandis que l'abattement est tout de même faible (17 % en moyenne).

- La turbidité de l'eau décantée est beaucoup trop élevée après 6 heures de filtration (moyenne de 7 NTU, avec un écart-type de 2 % seulement).

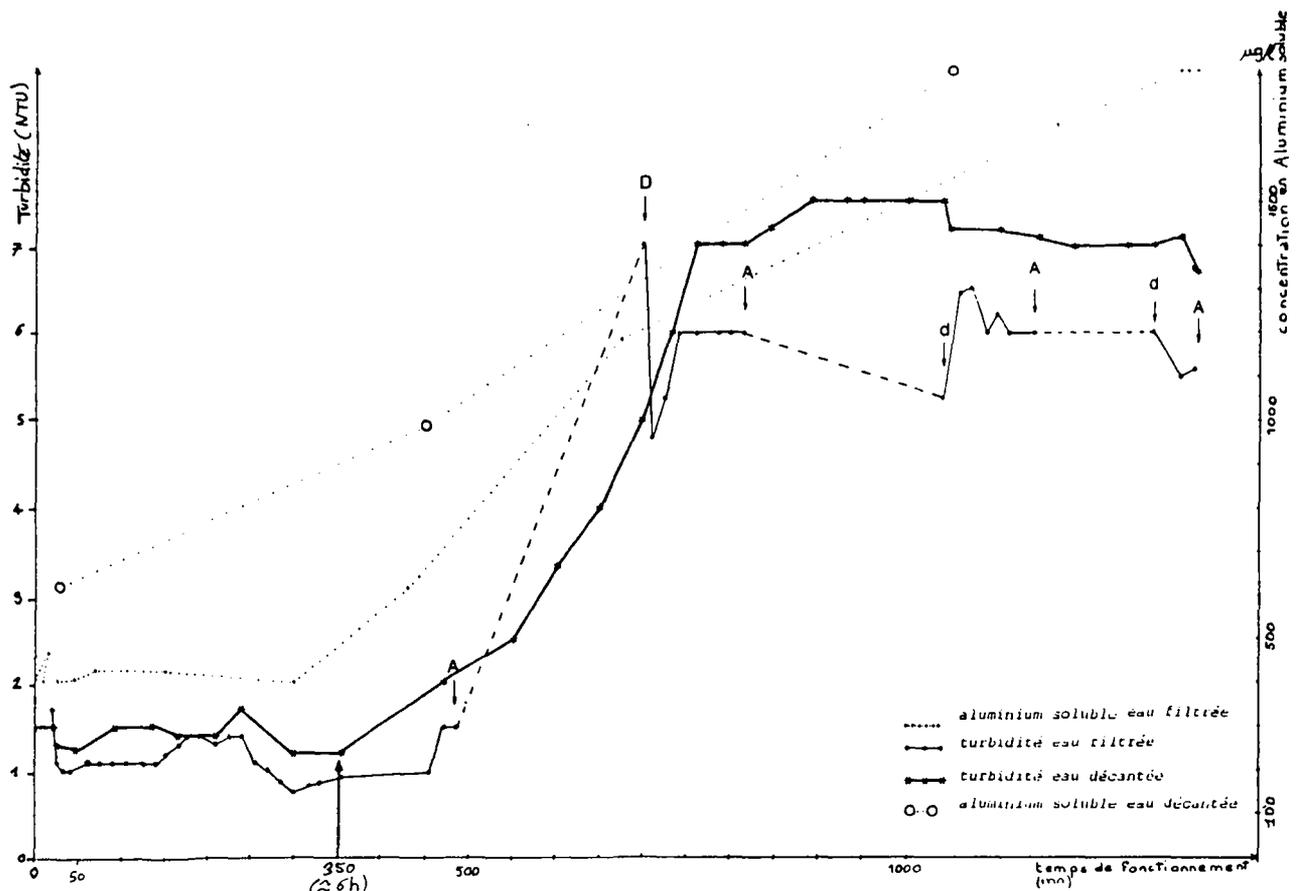


Fig. 39. : Turbidité et teneur en aluminium soluble de l'eau filtrée et décantée en fonction du temps à GUEHEBERT.

- La qualité de l'eau filtrée est beaucoup trop mauvaise (turbidité moyenne de 3,1 NTU avec un écart-type de 2,4 % seulement).

- La courbe de turbidité de l'eau décantée augmente progressivement et se stabilise vers 7 NTU, ce qui prouve que la qualité médiocre de l'eau n'est pas due à une pointe de turbidité sur l'eau brute par exemple, mais bien à un défaut de traitement.

- Les résultats de l'analyse de l'aluminium présent en solution dans l'eau filtrée, concordent avec les données pour assurer que le traitement au sulfate d'alumine était beaucoup trop important. La concentration en aluminium soluble augmente avec le temps, à la fois pour l'eau filtrée et pour l'eau décantée (la pompe doseuse serait-elle tombée en panne...).

- Le comptage particulaire des échantillons montre (cf. annexe III-2) que 50 % seulement des particules dénombrées sont comprises entre 1  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$ .

Soient les tableaux suivants :

Comptage particulaire

CH	Taille $\mu\text{m}$	Nombre	% CUM
1	$1 < x < 2 \mu\text{m}$	2647	50 %
2	$2 < x < 4 \mu\text{m}$	1479	28,6 %
3	$4 < x < 8 \mu\text{m}$	699	13,5 %
4	$8 < x < 16 \mu\text{m}$	268	5,2 %
5	$16 < x < 32 \mu\text{m}$	71	1,4 %
6	$x > 32 \mu\text{m}$	3	0,06 %

t = 30 mn

Eau filtrée

Nombre total de particules : 5170 dans 10 ml dilué  $1/10^2$

$$\% \text{ CUM} = \frac{\text{nombre de particules de taille } x \text{ comprises entre 2 valeurs}}{\text{nombre total de particules}}$$

Comptage particulaire

CH	Taille $\mu\text{m}$	Nombre	% CUM
1	$1 < x < 2 \mu\text{m}$	1709	49 %
2	$2 < x < 4 \mu\text{m}$	1068	30 %
3	$4 < x < 8 \mu\text{m}$	538	15,4 %
4	$8 < x < 16 \mu\text{m}$	151	4,3 %
5	$16 < x < 32 \mu\text{m}$	34	0,9 %
6	$x > 32 \mu\text{m}$	1	0,03 %

t = 299 mn

Eau filtrée

N = 3501

D'après le tableau en annexe III-1, pour t = 616 mn, le pourcentage de particules comprises entre 4  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$  était de 5 % alors qu'il est de 15 % ici. De plus, les particules de 1 à 2  $\mu\text{m}$  représentent toujours 50 % du nombre total de particules, alors que précédemment à la fin du cycle, le pourcentage descendait à 40 %. Ceci prouve encore deux choses:

- d'une part, les "fines" (1 - 2  $\mu\text{m}$ ) traversent le filtre tout le long du cycle ;
- d'autre part, les particules de 4 à 8  $\mu\text{m}$  de diamètre n'ont pas assez floculé.

Une explication plausible à ce phénomène est que le sulfate d'alumine se trouvant en quantité trop importante, le pH de floculation doit être très bas, et les matières en suspension de petite taille (4-8  $\mu\text{m}$ ) floculent moins.

- La perte de charge mesurée au cours du cycle de filtration montre (fig. 40) que le colmatage est peu important (seulement 30 cm de hauteur d'eau en 22 h de filtration). Le filtre (0,80 m de profondeur) est encore propre, ce qui correspond bien au fait qu'il ne retient pas les matières en suspension, ce que l'étude de la turbidité avait montré.

### 6.3 - Bilan

Cette station est un parfait exemple de l'utilité de l'étape de floculation et décantation. Le filtre ne retenant que 50 % des particules les plus fines (1-2  $\mu\text{m}$ ), un surplus de sulfate crée une turbidité anormalement élevée. De plus, les normes en aluminium sont largement dépassées (0,9 mg/l dans l'eau filtrée au lieu de 0,2 mg/l). Il faut espérer que cet incident soit accidentel, et de courte durée. A ce propos, un essai de floculation (JAR Test) par semaine est nécessaire pour éviter ce genre de problème.

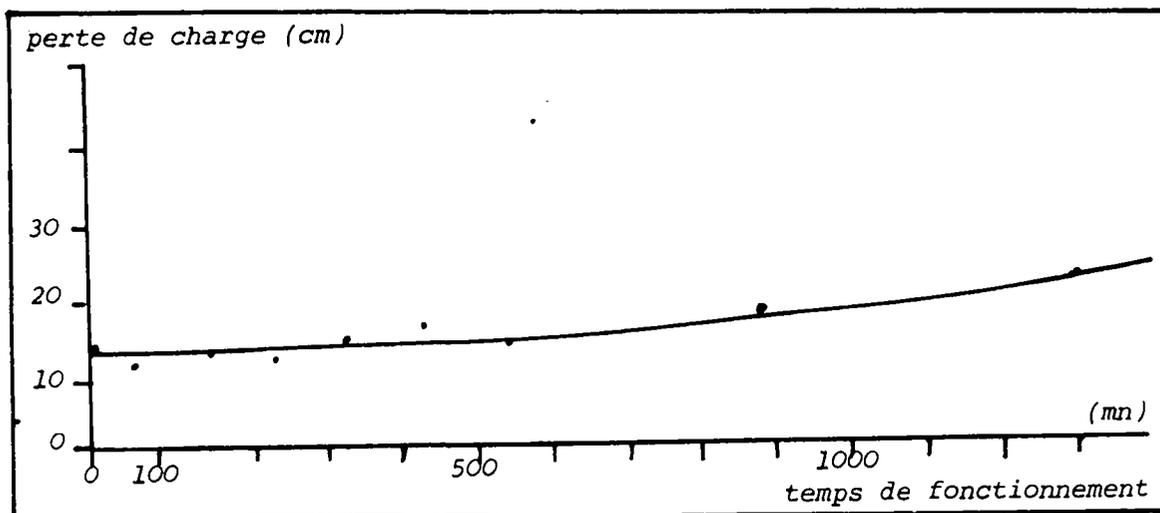


Fig. 40. : Evolution de la perte de charge au cours du temps à GUEHEBERT.

## 7 - NICORPS (COUTANCES, MANCHE)

### 7.1 - Caractéristiques

- Débit exhaure :  $200 \text{ m}^3/\text{h}$   
(rivière la Saille)
- Production estivale :  $2800 \text{ m}^3/\text{j}$
- Coagulation : lait de chaux
- Floculation : sulfate d'alumine :  $20 \text{ à } 40 \text{ g/m}^3$
- Décantation :  
1 décanteur type "pulsator" Surface  $36 \text{ m}^2$   
purge automatique  $\frac{Q}{Sh} = 5,5 \text{ m/h}$

- Filtration :
  - 2 filtres ouverts à sable
  - type "AQUAZUR T"
  - Surface unitaire :  $8,5 \text{ m}^2$
  - vitesse de filtration :  $11 \text{ m/h}$
  - lavage manuel par air et eau
  - profondeur du lit :  $0,85 \text{ m}$
  - granulométrie :  $1,35 \text{ mm}$
- Régulation du filtre
  - Compensateurs de colmatage
  - type Neyrpic. Hauteur amont
  - constante et débit constant
- Indicateurs de colmatage.
  - Les manomètres ne fonctionnent pas.

## 7.2 - Résultats - Interprétation

- La courbe de perte de charge (fig. 41) est linéaire en fonction du temps de fonctionnement du filtre. Le lit de sable est bien homogène et le colmatage se poursuit de façon constante dans chaque couche de sable.

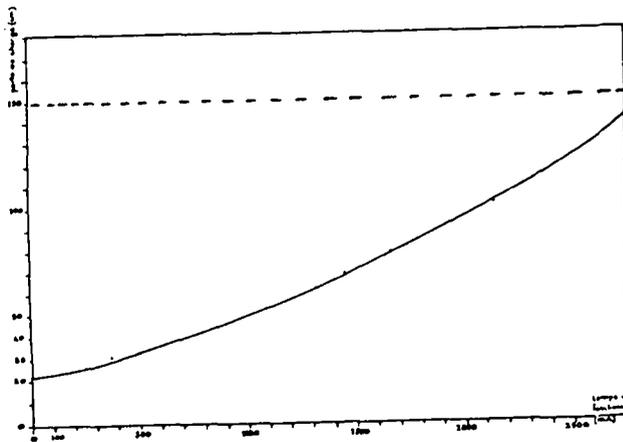


Fig. 41.

- Le tableau X en annexe II-7 est résumé dans la fig. 42. ci-dessous.

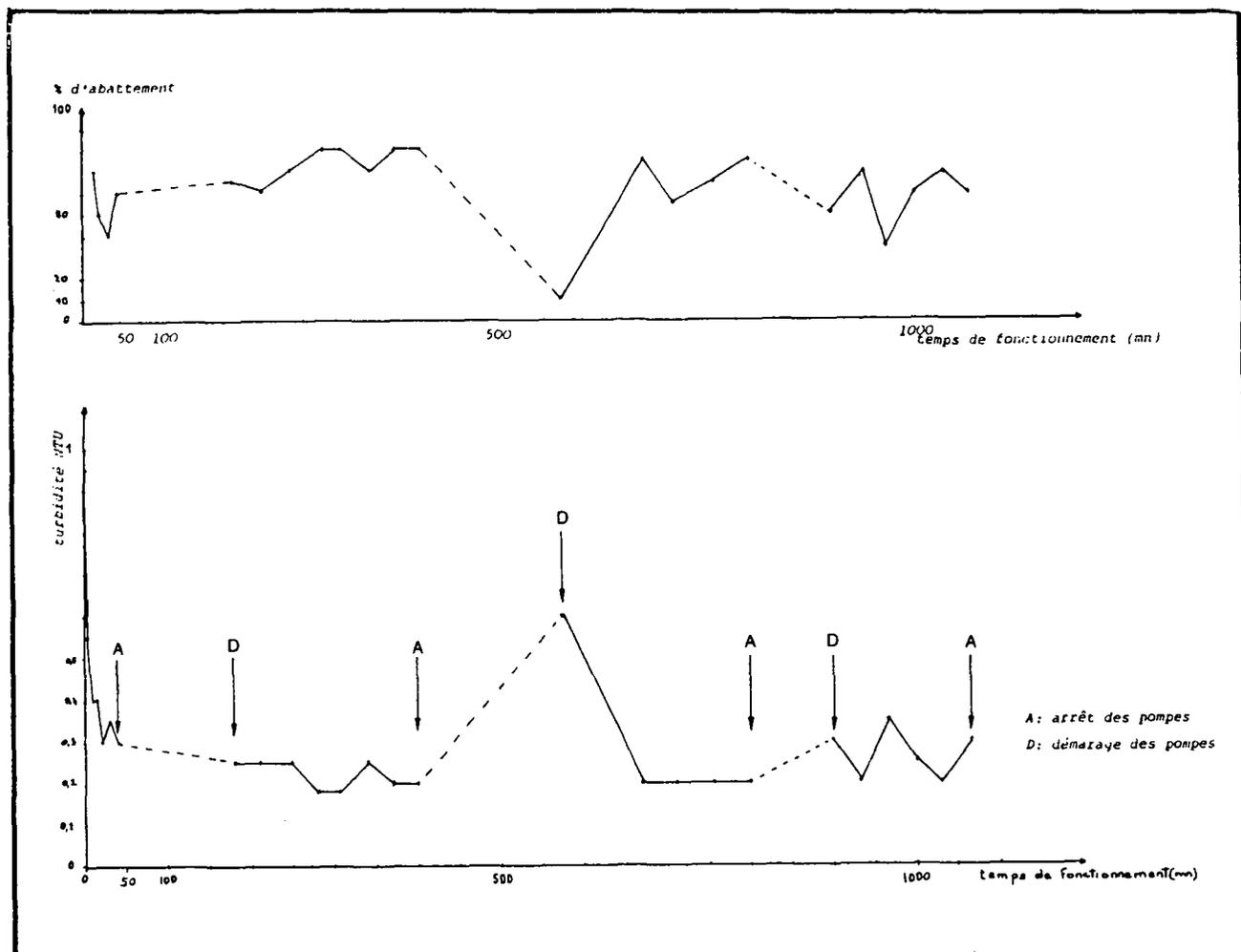


Fig. 42. : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée et du pourcentage d'abattement en fonction du temps à NICORPS.

Le rendement d'abattement est médiocre après chaque démarrage de pompes, de même que la qualité de l'eau filtrée (turbidité élevée). La turbidité de l'eau filtrée au début du cycle est plus élevée qu'après, comme sur toutes les autres stations.

Il faut indiquer de plus que l'augmentation de turbidité à chaque démarrage est inférieure à celle observée au début du cycle.

### 7.3 - Bilan

La station de NICORPS présente à peu près les mêmes problèmes que toutes les autres stations étudiées (qualité de l'eau médiocre après le lavage, augmentation de la turbidité de l'eau filtrée au démarrage des pompes). L'eau filtrée est encore peu turbide en fin de cycle, tenant compte du fait que la perte de charge augmente peu, il est possible d'augmenter la durée du cycle de filtration. Mais il ne faudrait pas dépasser 150 cm de perte de charge pour un filtre de 0,85 m de profondeur, soit environ deux jours de filtration (cf. fig. 41).



## II - SYNTHÈSE GÉNÉRALE



Il est important de faire le point sur l'ensemble des problèmes observés dans les stations.

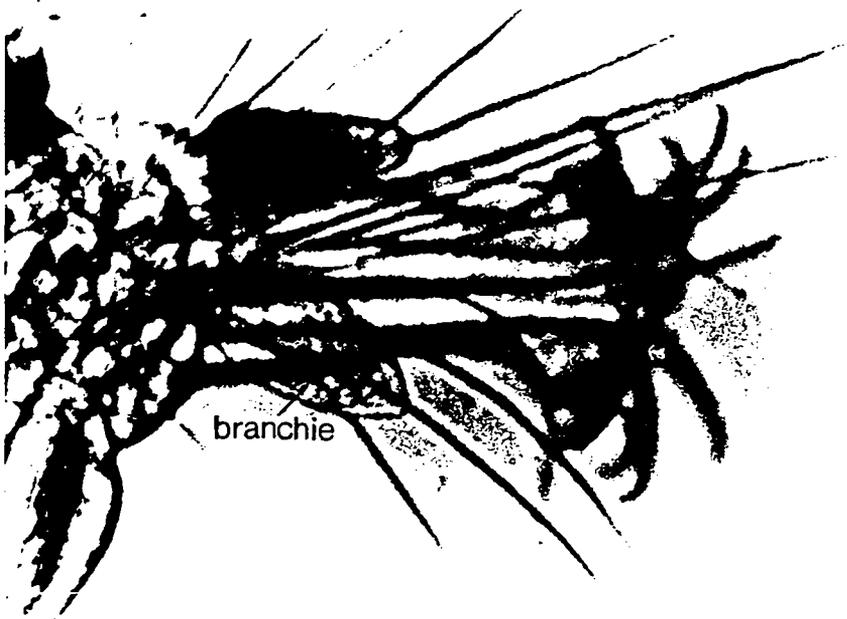
a/ Pour toutes les stations sans aucune exception, la qualité de l'eau filtrée est médiocre pendant les dix premières minutes suivant le lavage du filtre. Pour résoudre ce problème, il faudrait prévoir à la construction du filtre, une conduite de vidange qui permettrait de rejeter gravitairement l'eau filtrée de moins bonne qualité dans les égouts. Ces conduites existent déjà sur certaines stations (Nicorps et Guehébert), mais ne sont pas utilisées dans ce but. Cette évacuation de quelques m<sup>3</sup> d'eau (environ une trentaine) peut paraître futile, compte tenu de la dilution qui s'opère quand l'eau est distribuée directement dans un réservoir. Mais actuellement dans la conception des réseaux, la distribution directe chez l'abonné s'effectue d'abord, puis le surplus d'eau sert à alimenter un réservoir de stockage. Dans ce cas, compte tenu des prochaines normes de potabilité, surtout vis-à-vis des concentrations en aluminium soluble, il est préférable d'intervenir dès à présent afin d'éviter que des personnes (dialysés) ne soient en danger. D'autre part, le comptage particulaire en début de cycle (cf. annexe III-2) montre qu'après 15 mn de filtration, le nombre de particules ayant traversé le filtre diminue de moitié. Au début du cycle, 80 % de ces particules ont une taille comprise entre 1 et 4 µm, ce qui permet à des corpuscules de cette taille, comme certains oeufs d'insectes, de traverser le filtre.

A Coutainville (Manche), des abonnés ont découvert entre le 15 et le 20 juillet, dans l'eau du robinet de petites larves rouges. Après identification, ces larves proviennent de la ponte d'un diptère, de la famille des chironomidés (moustique), *Chironomus plumosus*. La tête et les branchies anales caractéristiques (cf. schéma n° 1) sont visibles sur les photographies ci-après. Le chironomus plumosus pond ses oeufs (1-5 µm) par paquet sur l'eau semi-stagnante des filtres ; au cours du lavage, les oeufs sont mis en expansion avec le sable, et certains traversent le filtre au début du cycle, lorsque les pores sont peu colmatés. Ce cas n'est malheureusement pas isolé, de mêmes problèmes sont arrivés à Bordeaux, à St-Malo et à Caen. Les oeufs ne se développent qu'en milieu aéré et chaud, et résistent à une chloration de 50 g/m<sup>3</sup>, ce qui explique leur pullulation l'été dans les canalisations (non en charge) après la station (donc chez l'abonné). Un moyen de lutter contre ce phénomène est de vidanger le filtre pendant un quart d'heure après le lavage. Le coût des travaux de pose d'une vanne de vidange, d'une conduite d'évacuation, et de génie civil (percement de cloisons) revient à environ 1 % de l'investissement de la station.



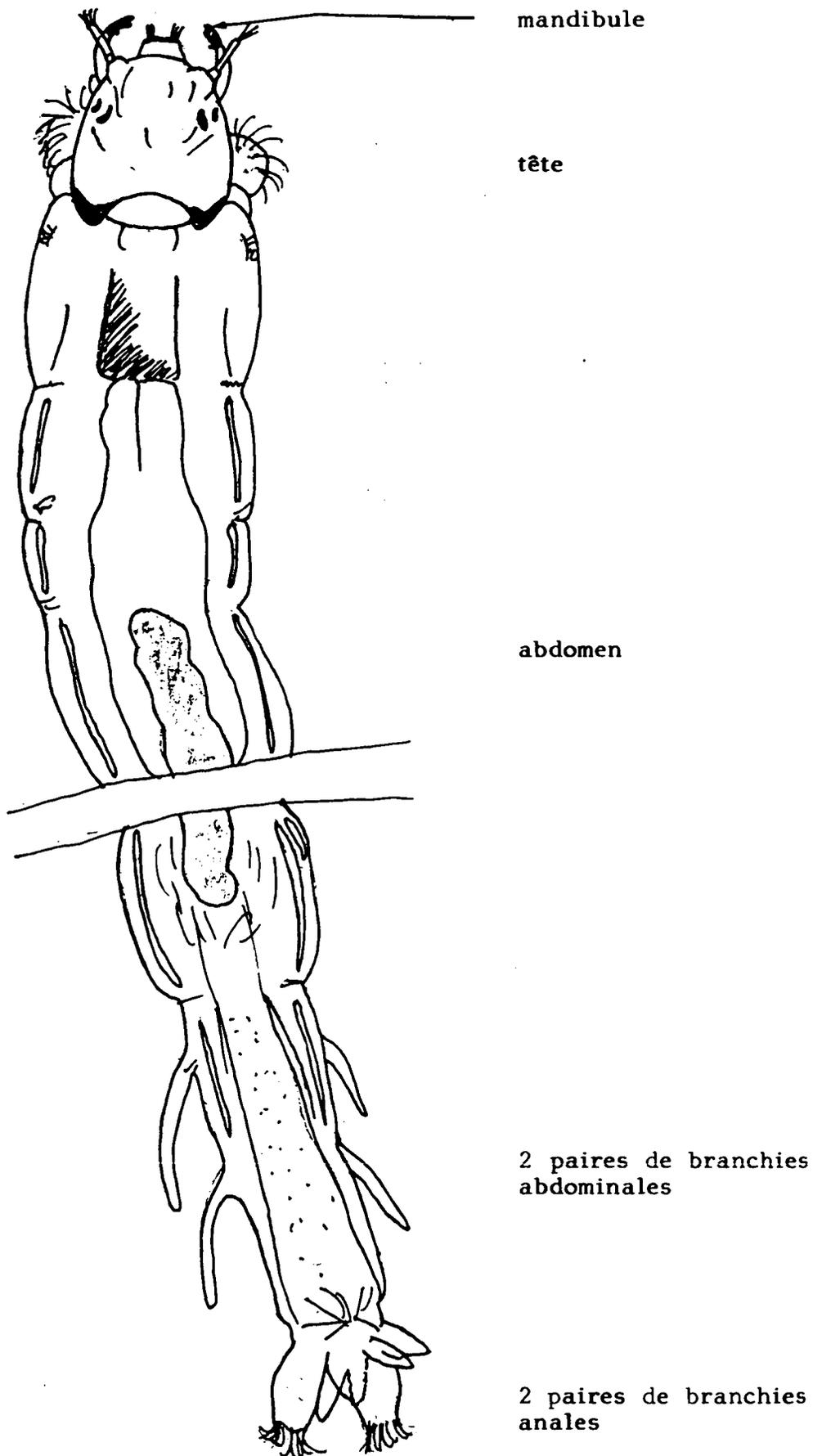


Tête et mandibules du *Chironomus plumosus* (photographie au microscope optique x 1000).



Branchies anales caractéristiques du Chironome et ventouse de fixation.

Schéma n° 1 : *Chironomus plumosus* (x 100)



- b/ L'efficacité de la filtration est apparemment médiocre à chaque **redémarrage** de pompes (cf. St-Aubin, Nicorps, Donville). Mais l'augmentation de turbidité est toutefois peu marquée.
- c/ A deux reprise (station de Lagny et de Guehébert) la concentration en **aluminium soluble** était hors des normes des eaux d'alimentation. Plus qu'un problème de filtration, ce phénomène provient d'une floculation inadaptée.
- d/ La grande majorité des stations dispose d'un **indicateur de colmatage** (perte de charge) pour chaque filtre. Mais le plus souvent, cet indicateur est un manomètre qui est **dérégulé**, et n'est plus utilisé. Seule la station de St-Aubin est équipée de simples piézomètres qui indiquent très clairement la hauteur d'eau après le filtre, correspondant à la perte de charge. Il **serait très utile** pour mieux gérer les périodes de lavage des filtres, de **disposer d'une prise de pression et d'un simple piézomètre dans chaque station**. L'évolution de la perte de charge au cours du temps permet d'avoir une bonne idée du colmatage du filtre, et à partir de là, la qualité future de l'eau filtrée.
- e. Sur quelques stations (Lagny, Chessy, Guehébert et Etampes (2ème cycle)), la **qualité de l'eau filtrée** s'est détériorée en fin de cycle. L'analyse comparée des courbes de perte de charge sur ces stations montre qu'à l'instant où l'efficacité du filtre décroît, la perte de charge augmente de façon exponentielle, et surtout dépasse la perte de charge maximale admissible par construction. Pour empêcher ce phénomène de percement du filtre, il faut réduire le cycle de filtration et ne pas dépasser la perte de charge limite imposée par le concepteur.
- f/ La **granulométrie** du sable intervient pour beaucoup dans la forme des courbes de perte de charge. Pour les stations à forte granulométrie (Lagny, St-Aubin, Donville, Nicorps), la courbe évolue très peu au cours du temps. Dans le premier cas (Etampes), la qualité de l'eau filtrée est bonne, tandis que dans le second cas, (Guehébert, Chessy), le colmatage se produit en surface sur environ 20 à 30 cm de sable, et le filtre perce en profondeur. Pour enrayer ce phénomène qui survenait avant à Etampes, une adjonction de silicate sur le filtre a permis de fixer les particules en suspension.

L'efficacité de la filtration apparaît donc en grande partie liée à une bonne maîtrise, de l'exploitation, plus qu'à une conception poussée.



## CONCLUSION

---

Le but de l'étude était d'apprécier les problèmes susceptibles de se produire pendant l'étape de filtration. Les expérimentations ont permis de se rendre compte que des incidents apparaissent effectivement au cours d'un cycle de filtration. Ces problèmes ne sont pas d'ordre fondamental (conception du filtre), mais relèvent plutôt du domaine de l'exploitation. Certains conseils peuvent aider à améliorer la qualité de l'eau filtrée :

- Optimisation du pH de floculation.
- Diminution de la turbidité de l'eau décantée.
- Surveillance effective de la perte de charge.
- Evacuation de l'eau filtrée dans les quinze premières minutes suivant le lavage du filtre.



## BIBLIOGRAPHIE

---