A microscopic image of activated sludge filaments, showing a dense network of thin, brownish-yellow fibers with some larger, more complex structures. The background is dark, making the filaments stand out.

Ministère de l'Agriculture et de la Forêt  
Fonds National pour le Développement  
des Adductions d'Eau

**GUIDE TECHNIQUE  
SUR LE FOISONNEMENT DES BOUES ACTIVÉES**

Documentation technique  
F N D A E  
N° 8



# GUIDE TECHNIQUE SUR LE FOISONNEMENT DES BOUES ACTIVÉES

**Roger Pujol** CEMAGREF groupement de Lyon  
3, quai Chauveau - 69336 Lyon Cedex 9

**Alain Vachon** Agence de L'Eau Loire-Bretagne  
Avenue de Buffon - BP 6339 - 45043 Orléans Cedex

**Guy Martin** École Nationale Supérieure de Chimie de Rennes  
Avenue du Général-Leclerc - 35700 Rennes Beaulieu



**CENTRE NATIONAL  
DU MACHINISME AGRICOLE  
DU GÉNIE RURAL  
DES EAUX ET DES FORÊTS**

**DIRECTION GÉNÉRALE**  
Parc de Tourvoie 92160 Antony  
Tél. : (1) 40 96 61 21  
Télex : 204 565 F  
Télécopie : (1) 40 96 61 39

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Guide technique sur le foisonnement des boues activées — 1990 — R. Pujol — 1<sup>re</sup> édition, ISBN. 2-85362-200-2 — Dépôt légal 4<sup>e</sup> trimestre 1990 — Documentation technique FNDAE n° 8 — Photos et dessins : CEMAGREF — Impression AZIMUT — 2, rue Léon Blum — Résidence Le Ponchelet — BP 103 — 62110 HÉNIN-BEAUMONT — Secrétariat de Rédaction : C. Herblot, Secrétariat d'Édition : M. Boudot-Lamotte — Edition et diffusion : CEMAGREF-DICOVA — BP 22 — 92162 ANTONY Cedex — Prix : 85 F

Ce document a été réalisé à la demande du Ministère de l'Agriculture (Direction de l'Espace Rural et de la Forêt) par la Division Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture du CEMAGREF, Groupement de Lyon, grâce au concours financier du Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE).

R. PUJOL en a assuré la rédaction et l'illustration avec les collaborations de A.VACHON et G.MARTIN.



# SOMMAIRE

## *Introduction*

### **1 - La décantation des boues activées**

#### **1.1. Rappels**

#### **1.2. Le décanteur secondaire**

##### *1.2.1. Aspects hydrauliques*

##### *1.2.2. Conception et dimensionnement*

#### **1.3. Exploitation des ouvrages**

### **2 - Typologie des difficultés de décantation**

#### **2.1. Les difficultés liées à la floculation des boues**

*1<sup>er</sup> cas : Croissance dispersée*

*2<sup>e</sup> cas : Déglocculation*

*3<sup>e</sup> cas : Floc organique peu dense*

#### **2.2. Les difficultés liées à la densité apparente des boues**

*1<sup>er</sup> cas : Fermentation des boues*

*2<sup>e</sup> cas : Dénitrification*

*3<sup>e</sup> cas : Mousse stables*

#### **2.3. Les difficultés liées à la faible compacité des boues**

*1<sup>er</sup> cas : Expansion anormale du lit de boue*

*2<sup>e</sup> cas : Foisonnement*

### **3 - Le foisonnement des boues activées**

#### **3.1. Le diagnostic**

*3.1.1. L'indice de boue*

*3.1.2. L'observation microscopique*

#### **3.2. Les microorganismes filamenteux**

*3.2.1. Les formes de croissance bactérienne*

*3.2.2. L'identification des germes filamenteux*

**3.2.3. Relations entre les microorganismes et leur milieu**

### **3.3. Causes et mécanismes du foisonnement**

**3.3.1. Les causes du foisonnement**

**3.3.2. Les mécanismes explicatifs**

**3.3.3. Conclusion**

## **4 - Les moyens d'action**

### **4.1. Conception et aménagement des ouvrages**

**4.1.1. Techniques à gradient de charge**

**4.1.2. Le procédé contact stabilisation**

**4.1.3. Les filières de traitement à double étage**

### **4.2. Conditions d'exploitation**

**4.2.1. Optimisation de l'aération**

**4.2.2. Complémentation en nutriments**

**4.2.3. Lestage des boues**

**4.2.4. Les techniques chimiques**

**4.2.5. Techniques mécaniques**

### **4.3. Choix des moyens d'action**

## **Conclusion**

**Fiche technique 1 : La zone de contact**

**Fiche technique 2 : Chloration des boues pour maîtriser le foisonnement**

**Annexe 1 : Procédure expérimentale de l'indice de boue**

**Annexe 2 : Détermination des principaux microorganismes filamenteux  
fiche d'observation type**

**tableau des caractéristiques des principaux micro-organismes observés dans les boues activées**

**description et illustration des principaux micro-organismes filamenteux**

**procédures utilisées pour les colorations**

## **Références bibliographiques**



## Introduction

Le procédé biologique de traitement des eaux résiduaires par boues activées reste de loin le plus répandu puisqu'il représente environ 80% du parc national de stations d'épuration.

Cet état de fait est principalement lié aux facilités d'adaptation du procédé et à ses performances épuratoires élevées.

Au cours des dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés sur le plan technologique pour optimiser la conception et les règles de dimensionnement des stations d'épuration. Cependant, on peut constater que de nombreuses installations sont sujettes à des problèmes de fonctionnement dont les origines sont souvent imputables à des déséquilibres biologiques et/ou hydrauliques. Ces déséquilibres peuvent perturber gravement la décantation secondaire et rendre difficile, voire impossible la séparation gravitaire des boues et de l'eau épurée.

Parmi ces problèmes de décantation, le foisonnement des boues est le plus fréquent. Il résulte du développement excessif de microorganismes filamenteux qui affectent négativement les propriétés de décantation de la boue.

Différentes enquêtes (Royaume-Uni, RFA, USA, ...) révèlent que 30 à 50% des stations d'épuration par boues activées sont sujettes au foisonnement. Sur le territoire français, une station sur quatre est atteinte (PUJOL et CANLER, 1989) ; et il apparaît que 77% de ces installations déversent épisodiquement (ou régulièrement) une partie de leurs boues dans le milieu récepteur.

Le présent document doit être considéré comme un guide s'adressant aux praticiens de stations d'épuration à boues activées. Ils y trouveront les éléments leur permettant de caractériser les difficultés qui perturbent la phase de décantation des boues. A partir d'un diagnostic précis, ils pourront remonter aux origines de ces difficultés et envisager des solutions adaptées à leur cas particulier.

Dans la première partie de cet ouvrage sont rappelées les règles élémentaires régissant la décantation des boues activées et le fonctionnement des décanteurs secondaires. Au second chapitre, une typologie des différents problèmes liés à la décantabilité des boues est dressée.

Le foisonnement des boues proprement dit est étudié dans le troisième chapitre. Les éléments permettant d'établir un diagnostic sont fournis, notamment en ce qui concerne l'identification des germes filamenteux. Sont également détaillés les origines et mécanismes qui conduisent à la prolifération de germes filamenteux dans les boues.

La quatrième partie est consacrée à la présentation des principaux moyens d'action utilisés sur le terrain pour juguler différents cas de foisonnement. Face à la diversité des solutions possibles, des éléments de réflexion sont proposés pour guider les décideurs vers des solutions adaptées à chaque cas particulier.

Deux moyens d'action (zone de contact, chloration) retenus en fonction de leur efficacité démontrée sont détaillés dans les fiches techniques jointes au présent ouvrage.

Enfin, deux annexes complètent le document :

— la première décrit la procédure permettant d'apprécier la décantabilité des boues (indice de boue) ;

— la seconde consigne les éléments nécessaires à la reconnaissance des filaments par examen microscopique. La méthode d'observation s'appuie sur une clé de détermination des principaux germes filamenteux fondée notamment sur des critères morphologiques et illustrée par différentes photos.



# La décantation des boues activées

# 1

## 1.1. Rappels

L'épuration biologique des eaux usées par le procédé des boues activées est principalement basée sur l'activité de cultures bactériennes maintenues en état aérobie dans le bassin d'aération et alimentées par l'eau à épurer.

Ces microorganismes, leurs prédateurs associés (microfaune) et diverses particules en suspension (débris végétaux et minéraux) constituent des agglomérats désignés habituellement par le terme de floc, l'ensemble floc-eau interstitielle constituant la boue activée.

En conditions normales, la boue a une couleur marron plus ou moins foncé et elle a la propriété de sédimenter en absence d'agitation ; la nature des boues influe directement sur leur décantabilité.

La séparation boue-eau traitée par sédimentation est assurée par le décanteur secondaire ou clarificateur placé à l'aval du bassin d'aération (fig. 1).

L'efficacité et la fiabilité de l'épuration restent étroitement dépendantes du bon déroulement de la phase de décantation. Celle-ci constitue en effet le dernier maillon de la chaîne de traitement avant rejet dans le milieu naturel.

Les problèmes observés à ce niveau du traitement sont malheureusement fréquents et imputables à une médiocre décantabilité des boues ou (et) à des anomalies de conception et de fonctionnement du clarificateur. Avant d'aborder l'analyse détaillée des difficultés liées à la qualité des boues, et plus particulièrement au foisonnement, il est souhaitable de rappeler les caractéristiques fondamentales d'un décanteur secondaire.

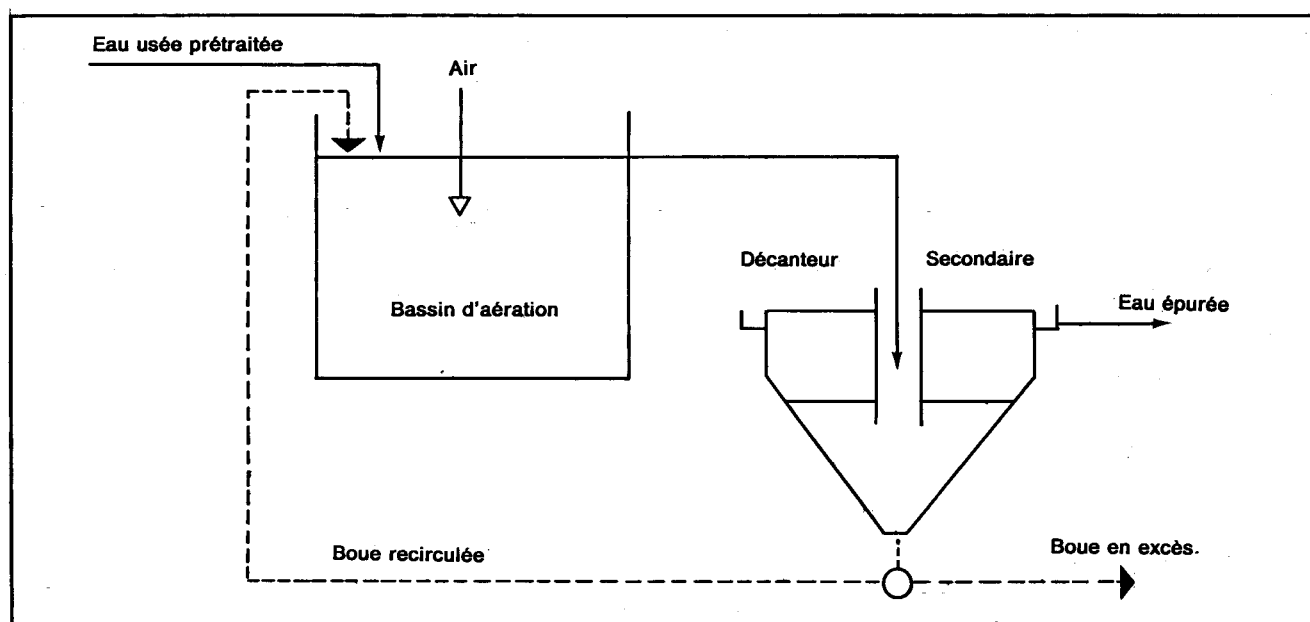


Figure 1 : Schéma général du procédé de traitement des eaux usées par boues activées.

## 1.2. Le décanteur secondaire

### 1.2.1. Aspects hydrauliques

Schématiquement, le phénomène de décantation consiste à créer dans le décanteur des conditions de vitesse telles que le flux d'eau épurée ascendant ne perturbe pas la descente des particules que l'on souhaite concentrer en fond d'ouvrage puis ensuite soutirer (recirculation, extraction des boues en excès) (fig. 2).

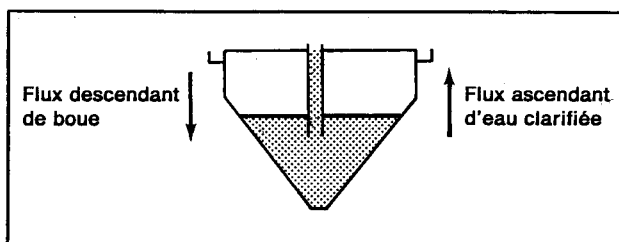


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'un décanteur.

Le décanteur étant alimenté en boues, il existe une limite hydraulique au-delà de laquelle on observe une perturbation dans la descente des particules, un effet d'engorge-

ment du décanteur et à terme, un débordement du lit de boue (perte de boue).

Chaque ouvrage de décantation est caractérisé par un paramètre technique fondamental : la vitesse ascensionnelle (ou charge hydraulique superficielle). Cette vitesse est calculée en divisant le débit admis dans l'ouvrage par sa surface libre (ou surface utile intéressée par la remontée de l'eau épurée) :

$$V_a = \frac{Q}{S}$$

$V_a$  : vitesse ascensionnelle exprimée en  $m^3/m^2 \cdot h$  ou  $m/h$

$Q$  : débit en  $m^3/h$

$S$  : surface de l'ouvrage en  $m^2$ .

Pour un décanteur normalement dimensionné et bien exploité, la vitesse ascensionnelle admissible est d'autant plus faible que l'aptitude des boues à la décantation est mauvaise, ou que la concentration de ces boues est élevée. Elle est une fonction décroissante du paramètre fictif  $V_c$  (volume corrigé) exprimé en  $ml/l$ , obtenu en faisant le produit de l'indice de boue  $I_B$  (qui permet d'apprécier l'aptitude de la boue à la décantation) par la concentration en boues à l'entrée du décanteur  $C_{BA}$  (fig. 3).

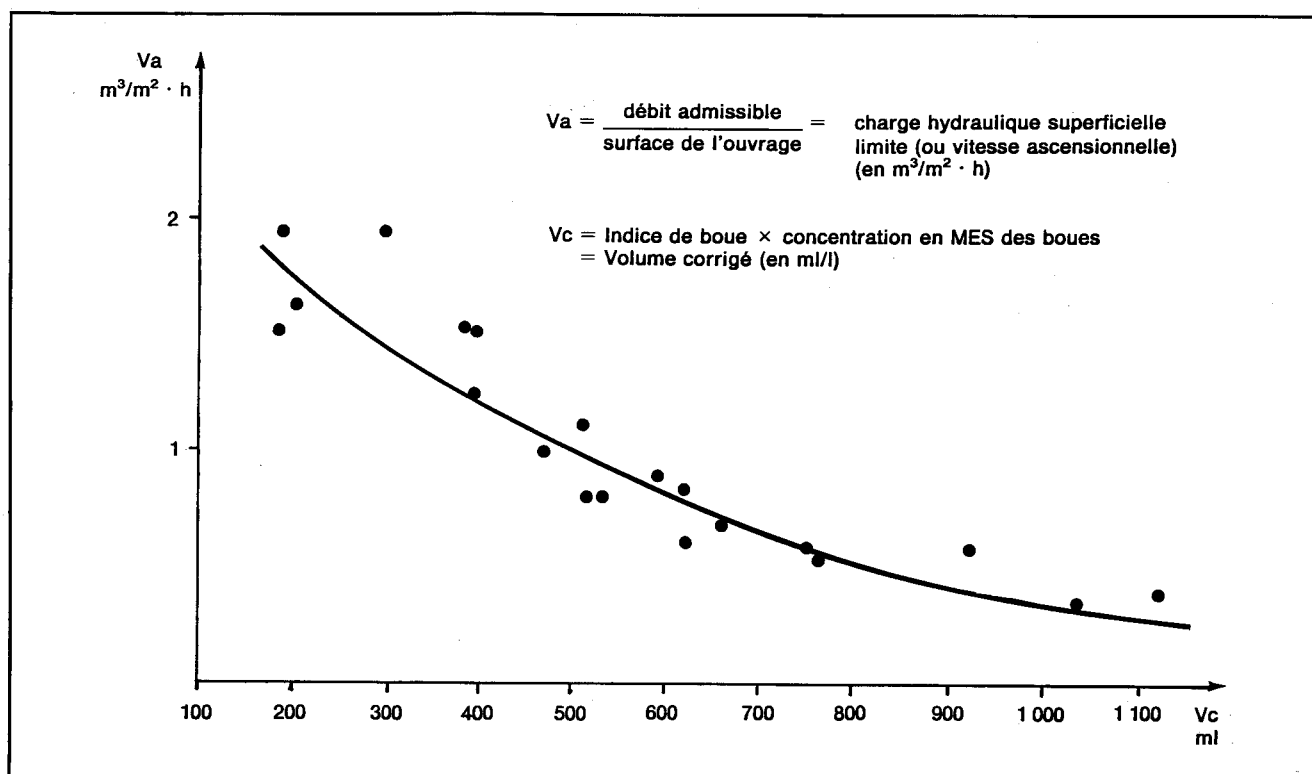


Figure 3 : Charge hydraulique superficielle limite en fonction du volume corrigé. (Décanteurs secondaires à flux vertical) d'après CTGREF - 1979.

**Remarques :**

— le test de l'indice de boue  $I_B$  est décrit au paragraphe 3.1.1,

— la concentration des boues est mesurée par l'analyse des matières en suspension (MES) selon la procédure normalisée (NF T90 105),

— la courbe est applicable aux décanteurs à flux vertical (cylindriques ou cylindro-coniques) tels que le ratio rayon/profondeur soit proche de 5). Les performances hydrauliques diminuent avec l'accroissement du ratio rayon/profondeur : 20 à 40 % de moins sur les décanteurs à flux horizontal (circulaire ou rectangulaire).

L'exemple ci-après illustre l'importance très forte des paramètres précédemment évoqués.

Prenons le cas d'une station d'épuration de 10 000 eq.hab. dont le décanteur a été dimensionné sur la base d'une vitesse ascensionnelle de 0,8 m/h pour un débit de pointe de 250 m<sup>3</sup>/h, cet ouvrage a donc une surface de l'ordre de 310 m<sup>2</sup>.

CAS N°	Indice de boue ml/g	C <sub>BA</sub> * g/l	Volume corrigé ml/l	V <sub>a</sub> m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · h	Débit admissible dans la station m <sup>3</sup> /h
1	100	5	500	1	310
2	200	5	1 000	0,4	120
3	100	10	1 000	0,4	120

\* C<sub>BA</sub> : Concentration en MES à l'entrée du décanteur

**Tableau 1 : Exemple de variation des débits admissibles sur une station.**

Dans les trois cas du tableau 1, la vitesse ascensionnelle limite indiquée est lue sur le graphe de la figure 3. L'admission de débits supérieurs à cette valeur limite rend les pertes de boue inévitables.

On constate dans cet exemple que le doublement du taux de boue en aération ou de l'indice de boue (par dégradation de la décantabilité) conduit à devoir diviser par environ 2,5 le débit admis sur la station pour maintenir un bon fonctionnement du décanteur secondaire. La limitation volontaire des volumes d'effluents à l'entrée de la station est alors souvent la solution extrême pour éviter les pertes de boue dans le milieu récepteur.

**La maîtrise de l'indice de boue et le maintien à un niveau raisonnable de la teneur en boue**

**du bassin d'aération constituent donc deux éléments essentiels du bon fonctionnement des stations d'épuration.**

## 1.2.2. Conception et Dimensionnement

### 1.2.2.1. Vitesse ascensionnelle

La plupart des ouvrages de décantation sont actuellement dimensionnés sur la base d'une vitesse ascensionnelle de 0,8 m/h pour les stations à faible charge massique et de 1,5 m/h pour les stations fonctionnant à des charges plus élevées (> 0,5 kg de DBO./kg MVS.j). Les éléments techniques exposés dans le précédent paragraphe montrent que la valeur de 0,8 n'est acceptable que si les boues sont de bonne qualité (IB < 120 ml/g) et que leur concentration ne dépasse pas 5 g/l. Les sécurités prises pour le dimensionnement des décanteurs ne sont donc pas suffisantes, d'autant plus que les données du projet concernant les débits (150 l/j en zone rurale, 300 l/j en milieu urbain) sont fréquemment dépassées.

Pour dimensionner un décanteur secondaire, il est donc recommandé de se reporter à la figure 3 pour calculer la surface nécessaire de décantation, sur la base d'un volume corrigé sécurisant. Le tableau 2 illustre la démarche à suivre pour quelques exemples types.

Effluent/ Type de boues activées	Concentrations de référence dans le bassin d'aération (g/l)	Indice de boues de référence (ml/g)	Volume corrigé	Vitesse ascensionnelle préconisée (m/h)
Domestique/AP	3,5	200	700	0,6
Urbain/MC	2,5	150	375	1,25
Laiterie/AP	5	250	1 250	0,25
Abattoir/AP	5	180	900	0,35

AP : Aération prolongée

MC : Moyenne charge

**Tableau 2 : Relation indice de boue-vitesse ascensionnelle préconisée (décanteurs à flux vertical).**

### 1.2.2.2. Profondeur

Un décanteur doit être en mesure d'assurer simultanément trois fonctions complémentaires :

— retenir un maximum de particules en suspension (clarification) ;

— concentrer les boues avant leur réintroduction dans le bassin d'aération (recirculation) ;

— stocker provisoirement des boues en cas de surcharge hydraulique temporaire (protection hydraulique).

Satisfaire ces objectifs exige une profondeur optimale de l'ouvrage.

Pour les décanteurs cylindriques ou cylindro-coniques, il convient de distinguer deux cas :

— En réseau séparatif (pointes de débit de faible durée), la hauteur d'eau totale ne doit pas être inférieure à 2 m à la périphérie (diamètre optimal de l'ouvrage : 10 à 12 m).

— En réseau unitaire (débit de pointe susceptible d'être atteint plusieurs heures d'affilée) une profondeur de 2,5 m à 3 m à la périphérie est conseillée.

Pour les ouvrages à flux horizontal parallélépipédiques ou cylindriques de grand diamètre (30 à 40 m), les profondeurs correspondantes devraient être comprises entre 3 et 4 m.

#### 1.2.2.3. Dispositif d'alimentation ou « Clifford »

Le clifford assure la bonne répartition du flux de boue à l'intérieur du décanteur ; son rôle est important pour le bon fonctionnement de l'ouvrage. Il doit être conçu de façon telle que les différentes fonctions du décanteur ne se contraignent pas.

Le clifford doit faciliter la dissipation de l'énergie engendrée par le passage du flux de

boue du bassin d'aération vers le décanteur (diminution des turbulences dans le décanteur,...). Pour ce faire, la vitesse de passage ne doit pas excéder 2,5 cm/s (débit de recirculation compris).

## 1.3. Exploitation des ouvrages

Toute défaillance dans ce domaine augmente les risques de dysfonctionnement et par conséquent diminue les potentialités de la station.

Prenons par exemple les réglages de l'aération : une mauvaise optimisation des temps et des séquences d'aération peut avoir des conséquences fâcheuses sur la qualité des boues produites :

— dénitrification dans le décanteur (suraération des boues, recirculation trop faible) ;

— accentuation de la croissance filamenteuse en cas de sous-aération (voir chapitres suivants) et dégradation de la décantabilité des boues.

De même, dans le domaine de la gestion de la production de boue, les extractions irrégulières ou trop importantes sont fréquemment des facteurs aggravants.

Point n'est besoin de multiplier les exemples dans ce domaine, il convient simplement de **rappeler que pour la conduite d'une station d'épuration, un personnel bien informé assurant un suivi régulier reste le meilleur garant de la qualité du traitement.**

# Typologie des difficultés de décantation

## 2

Les boues activées sont sujettes à des variations qualitatives qui rendent souvent précaire la bonne séparation boue-eau épurée dans le décanteur.

Pour un exploitant, ou un service d'assistance technique, le premier problème consiste donc à apprécier la nature des difficultés qui affectent le fonctionnement du clarificateur.

En première approche, la détection des anomalies repose d'abord sur des critères visuels :

— qualité de l'eau épurée (turbide, claire,...) ;

— observations visuelles de la surface des bassins (flottants,...).

— tests de décantation en éprouvette d'un litre (volume décanté en une demi-heure, aspect du surnageant...);

— observation microscopique sommaire de la boue (structure du floc,...) ;

A partir de ces critères simples, les divers cas possibles ont été regroupés en trois catégories, à savoir :

1) les difficultés liées à la **floculation** des boues,

2) les difficultés liées à la **densité apparente** des boues,

3) les difficultés liées à la **faible compaction** des boues.

## 2.1. Les difficultés liées à la floculation des boues

### 1<sup>er</sup> cas : croissance dispersée

Critères visuels :

— mousse légère blanchâtre en surface du bassin d'aération principalement,

— boue de couleur claire,

— effluent de sortie turbide,

— décantation en éprouvette difficile (interface eau-boue incertaine, particules en suspension non décantables) (fig. 4),

— microfaune composée de bactéries libres associées ou non à des protozoaires Flagellés (photo 1).

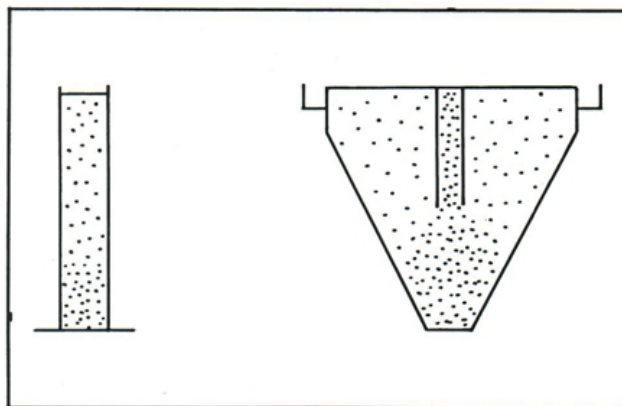


Figure 4 : Comportement de la boue en décantation.



Photo 1 : Structure microscopique de la boue (lumière naturelle 125 ×).

Nature des difficultés :

— boue jeune, croissance bactérienne dispersée (floc non formé).

Origine probable :

— station en phase de démarrage.

*Solution proposée :*

- accroître l'âge de la boue.

*Commentaires :*

Ces cas peuvent se produire lors de la mise en route de la station, ou faire suite à un incident majeur ayant provoqué la destruction de la biomasse (voir cas n° 2).

En règle générale, la situation se normalise rapidement (1 à 2 semaines) à l'exception de certaines stations à très forte charge où les difficultés peuvent perdurer.

### 2<sup>e</sup> cas : défloculation

*Critères visuels :*

- rejet de fines particules en surverse du décanteur,
- médiocre qualité de l'eau épurée,
- test de décantation difficile montrant un gradient croissant de concentration en particule dans l'éprouvette (fig. 5),
- microfaune rare.

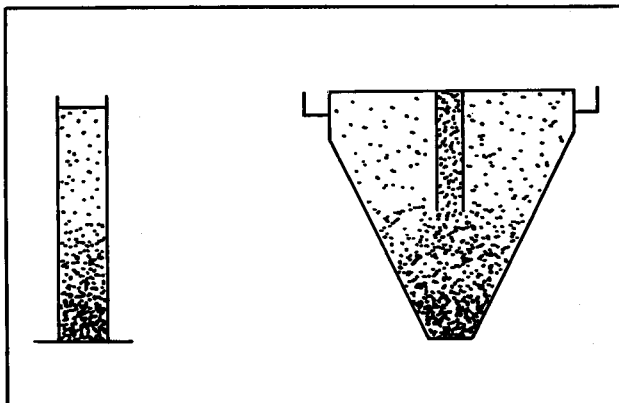


Figure 5 : Comportement de la boue en décantation.

*Nature des difficultés :*

- défloculation partielle (flocs « à la traîne ») ou totale (désagrégation des flocs, absence de microorganismes).

*Origines probables :*

- apports d'effluents toxiques, acidification du milieu, apport important de NaCl,...

*Solutions proposées :*

- rechercher et supprimer les apports toxiques dans le cas de phénomènes cycliques.

- en cas d'arrivée accidentelle de toxique (ex. : hydrocarbures...), retirer le polluant si possible puis remettre en service la station en espaçant les soutirages de boue jusqu'à retour à la normale.

*Commentaires :*

Le phénomène de floc « à la traîne » peut se manifester également lorsque la floculation est en cours de rétablissement dans la station (retour à une situation normale).

*Remarque :* Les accidents de défloculation vraie sont en principe rares sur les stations à boues activées à faible charge ( ou aération prolongée) traitant des effluents urbains.

### 3<sup>e</sup> cas : floc organique peu dense

*Critères visuels :*

- boue de couleur claire (faible concentration : 2 à 3 g/l maximum),
- perte de fines particules en sortie du décanteur (formation de « nuages » blanchâtres dans le décanteur),
- voile de boue souvent diffus et mal délimité,
- test de décantation montrant souvent des particules de floc en suspension dans le surnageant (fig. 6),
- microfaune normale, structure des flocs lâche, grains aux contours mal définis, de taille hétérogène (photo 2).

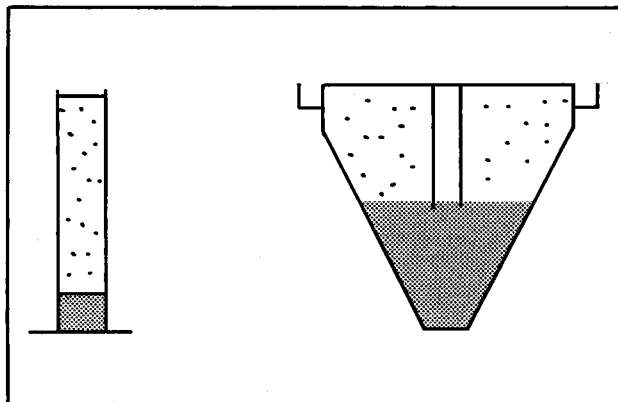


Figure 6 : Comportement de la boue en décantation.



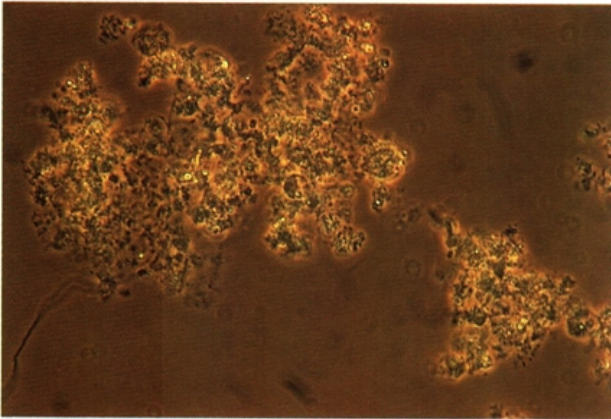


Photo 2 : Structure microscopique de la boue (contraste de phase 500 ×).

**Nature des difficultés :**

- développement d'un floc organique léger.

**Origines probables :**

- traitement d'effluents industriels peu concentrés en matières en suspension,
- stations d'épuration équipées de décanteur primaire et fonctionnant à des charges massiques élevées (> 0,5 kgDBO/kg MVS.j).

**Solutions proposées :**

- lestage des flocs par adjonction de réactifs (chaux par exemple) ou modification des conditions d'alimentation (by-pass partiel du décanteur primaire pour augmenter l'apport de matières en suspension dans la boue : effet de lest).

**Commentaires :**

Ces cas conduisent souvent à des indices de boue élevés malgré l'absence de microorganismes filamenteux dans les boues.

*Remarque :* Ils ont parfois été décrits par certains auteurs sous le terme de foisonnement non filamenteux.

## 2.2. Les difficultés liées à la densité apparente des boues

### 1<sup>er</sup> cas : fermentation des boues

**Critères visuels :**

- Remontée en surface du décanteur d'amas de boues (couleur noirâtre, malodoran-

te) présentant une forte densité de microbulles qui diminuent la densité apparente de la boue (fig. 7).

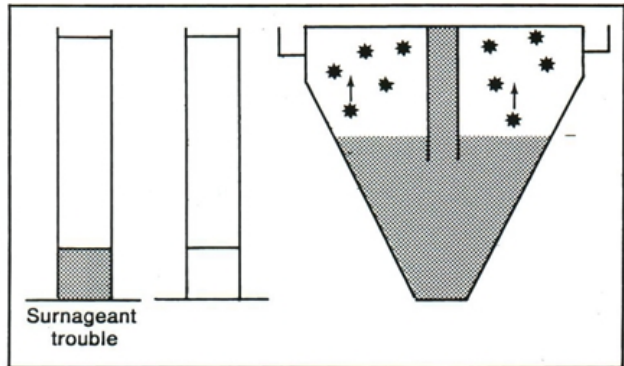


Figure 7 : Comportement de la boue en décantation.

**Nature des difficultés :**

- fermentation des boues.

**Origines probables :**

- absence prolongée d'oxygène dans les boues couplée à une microfaune rare dans les échantillons de boue prélevés dans le bassin d'aération (espèces caractéristiques de forts déficits en oxygène dissous : *Hyalophacus*,...).

Lors du test de décantation le surnageant est trouble,

- zones « mortes » dans le décanteur, dépôts, mais microfaune des boues activées normale,

- revêtement intérieur du décanteur dégradé (accrochage des boues),

- mauvaise condition de reprise des boues en fond du décanteur.

Dans ces trois derniers cas, la décantation en éprouvette est normale.

**Solutions proposées :**

- vérification du génie civil, remise en état, curage des zones de dépôt,

- augmentation des temps d'aération, changement de l'aérateur le cas échéant.

**Commentaires :**

La mise en fermentation complète des boues est exceptionnelle et ne se rencontre qu'en cas d'arrêt prolongé de l'aérateur (panne).

Les fermentations sont généralement localisées, ce qui ne provoque pas d'altération profonde de la qualité du traitement.

## 2° cas : dénitrification

### Critères visuels :

- boue de couleur marron (normale),
- remontée de particules (plutôt fines) associées à des microbulles de gaz,
- instabilité des flottants (facilement désagrégés après agitation),
- observation microscopique ne révélant pas d'anomalie particulière,
- accentuation du phénomène de flottation dans l'éprouvette lorsque le test de décantation est réalisé au soleil (en hiver notamment) ou avec un temps de décantation supérieur à 30 minutes (TEST 2 ; fig. 8).

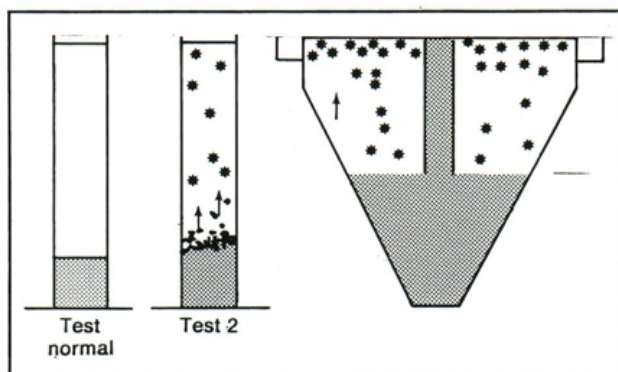


Figure 8 : Comportement de la boue en décantation.

### Nature des difficultés :

- phénomène de dénitrification se produisant dans le clarificateur.

### Origine probable :

- station à boues activées en aération prolongée, souvent sous-chargée, suraérée, recirculation trop faible (dénitrification non maîtrisée dans le bassin d'aération ou dans la zone d'anoxie).

### Solution proposée :

- modification des consignes d'aération et de recirculation afin de maîtriser la nitrification-dénitrification à l'amont du décanteur secondaire.

### Commentaires :

Les cas de dénitrification dans le clarificateur sont fréquents en début d'été sur les petites stations et bien connus des exploitants.

Un rabattement au jet ou un épisode pluvieux font disparaître momentanément ces flottants en surface du décanteur secondaire en les délestant de leurs microbulles d'azote.

## 3° cas : mousses stables

### Critères visuels :

- boue de couleur marron (normale),
- mousses flottantes très stables en surface des bassins d'aération et de décantation,
- test de décantation d'autant plus révélateur du phénomène que l'échantillon de boue est prélevé à la surface du bassin d'aération (fig. 9),
- présence de microorganismes filamenteux fins ( $\varnothing < 1 \mu\text{m}$ ) ou ramifiés et raides (*Nocardia sp.*), notamment dans les mousses (photo 3).

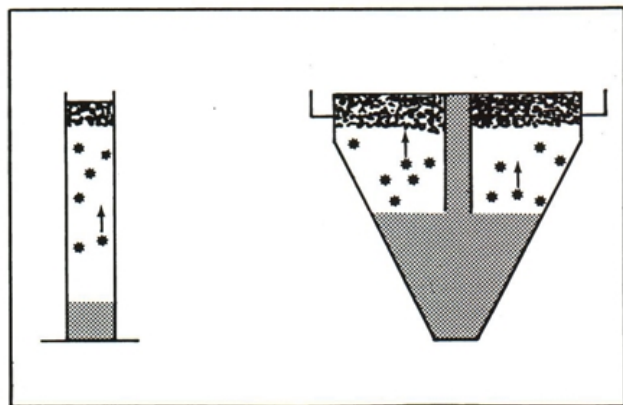


Figure 9 : Comportement de la boue en décantation.

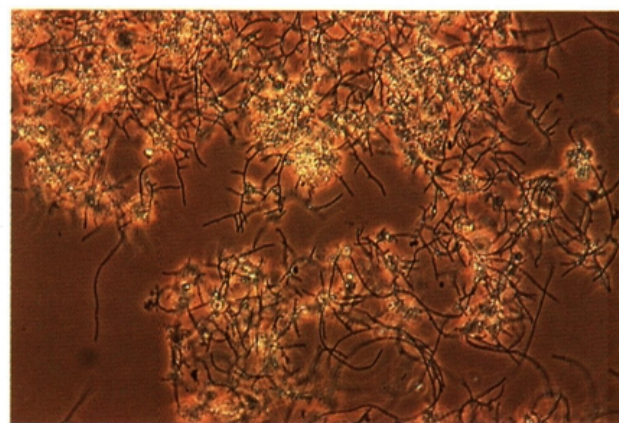


Photo 3 : Structure microscopique de la boue (contraste de phase 500  $\times$ ).

#### Nature des difficultés :

— Les mousses stables sont constituées de bulles d'air emprisonnées dans un mélange à forte densité de germes filamenteux (types particuliers) et de boue. PUJOL R (1990).

#### Origines probables :

— âge de la boue trop élevé (extraction des boues en excès insuffisante),  
— influence des graisses, admission d'effluents septiques (retour de digesteur...), état de déséquilibre nutritionnel.

#### Solutions proposées :

— diminution de la teneur en boue quand c'est possible,  
— mise en place d'une zone de contact (efficace pour certains filaments seulement),  
— traitements spécifiques : évacuation par pompage, ajout de réactifs (chlore,...).

#### Commentaires :

Les origines de ce problème biologique ne sont que partiellement connues, les déséquilibres nutritionnels jouent vraisemblablement un rôle majeur (voir 3.3.).

*Remarque :* Il s'agit principalement d'un problème d'exploitation se posant en termes économiques (manutention, transport, réactifs) car les rendements d'épuration demeurent satisfaisants tant que l'essentiel des flottants reste piégé dans la station.

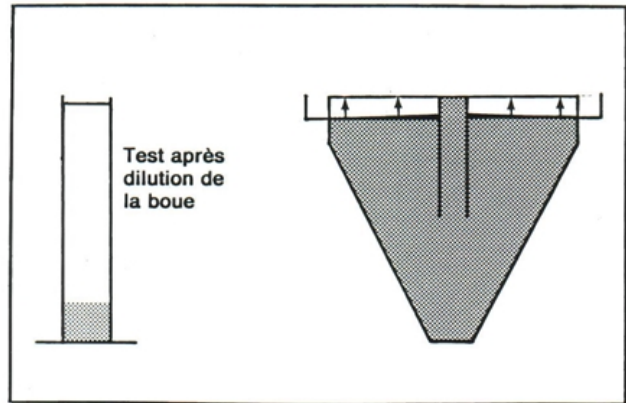


Figure 10 : Comportement de la boue en décantation.

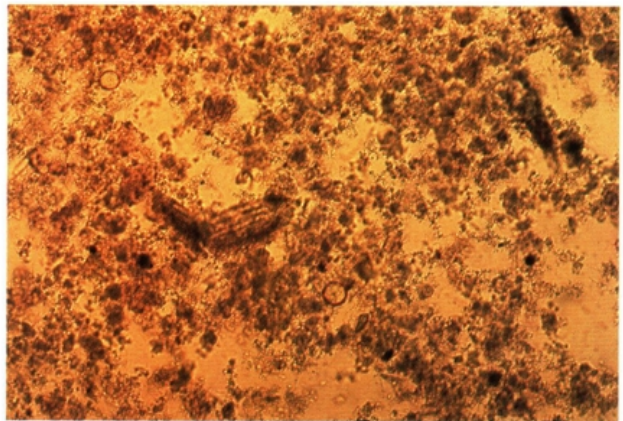


Photo 4 : Structure microscopique de la boue (1 Nat. 125 ×).

## 2.3. Les difficultés liées à la faible compacité des boues

### 1<sup>er</sup> cas : expansion anormale du lit de boue

#### Critères visuels :

— boue marron foncé,  
— pertes de boues épisodiques,  
— rejet de bonne qualité (hors pertes de boue),  
— test de décantation normal, mais nécessitant de fortes dilutions pour calculer l'indice de boue (fig. 10),  
— observation microscopique révélant un floc bien minéralisé, densité des grains élevée, microfaune peu abondante (photo 4).

#### Nature des difficultés :

— expansion anormale (et souvent cyclique) du lit de boue dans le décanteur.

#### Origines probables :

— concentration en boue trop forte dans le bassin d'aération,  
— stockage des boues dans le décanteur (recirculation insuffisante...),  
— surcharge hydraulique momentanée.

#### Solutions proposées :

— extraction régulière des boues en excès,  
— si la concentration des boues n'est pas excessive, écrêter les pointes hydrauliques.

### Commentaires :

Cette situation est fréquemment observée en hiver, sur les stations à boues activées en aération prolongée qui fonctionnent avec des taux de boues très élevés (10 g/l de MES, parfois plus). Elle trouve son origine dans les faibles capacités de stockage des boues en excès et dans l'impossibilité saisonnière de pratiquer l'épandage.

### 2<sup>e</sup> cas : foisonnement

#### Critères visuels :

- pertes de boues épisodiques ou chroniques entraînant très souvent une limitation volontaire des débits entrant dans la station,
- rejet épuré de très bonne qualité en absence de déversement de boue,
- test de décantation montrant un floc léger floconneux décantant et s'épaississant difficilement. Le calcul de l'indice de boue (voir paragraphe 2.1.1) rend impératif la dilution des échantillons de boue (fig. 11),
- observation microscopique mettant en évidence une microfaune bien établie, associée à une densité importante de microorganismes filamenteux (photo 5).

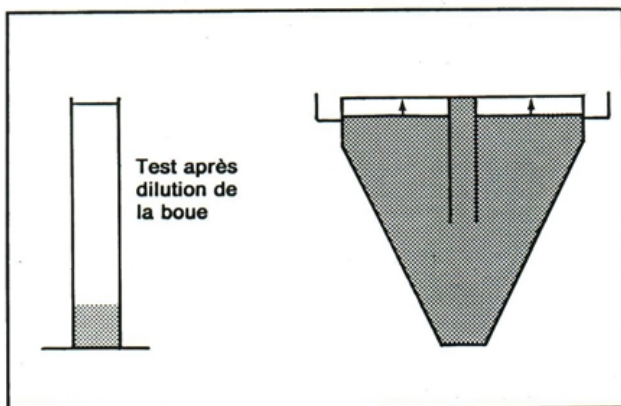


Figure 11 : Comportement de la boue en décantation.

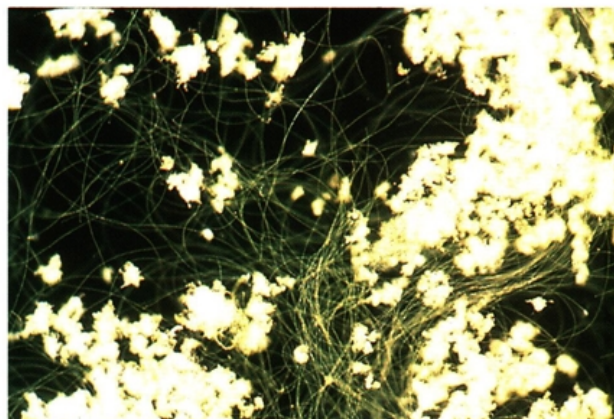


Photo 5 : Structure microscopique de la boue (fond noir 125 ×).

#### Nature des difficultés :

- foisonnement des boues (bulking chez les anglo-saxons ; terme également utilisé en langage technique courant).

#### Origines probables :

voir Chapitre 3.

#### Solutions proposées :

voir Chapitre 4.

#### Commentaires :

Le phénomène de foisonnement constitue le problème technique majeur de la décantation des boues. Il n'existe pas de remède universel pour résoudre ce problème biologique complexe qui en France frappe une station d'épuration sur quatre et notamment les installations à faible charge massique. Lorsque les stations traitent des effluents domestiques, des solutions simples peuvent bien souvent être mises en œuvre. Pour les cas les plus difficiles (industries, variations de charge, grosses collectivités,...), le choix de solutions adaptées aux conditions locales nécessitera une étude détaillée et approfondie de la station, complétée par des mesures spécifiques. Les chapitres suivants du document abordent en détail l'étude de ce phénomène.

# Le foisonnement des boues activées

# 3

## 3.1. Le Diagnostic

Trop souvent le foisonnement est invoqué dès lors que l'on constate des débordements du lit de boue au niveau du décanteur secondaire. S'il est vrai que les pertes de boue sont fréquemment en relation avec « cette maladie » des boues, les éléments précédents montrent que ce n'est pas une règle générale.

*Quand peut-on véritablement parler de foisonnement ?*

Le diagnostic repose sur deux observations complémentaires simples effectuées sur un échantillon de boue fraîchement prélevé dans le bassin d'aération :

- le test de décantation en éprouvette, qui permettra de déterminer un indice de boue supérieur à 200 ml/g,
- l'observation microscopique de la boue qui révélera la structure filamenteuse.

Si ces deux conditions sont réunies, l'état de foisonnement est caractérisé.

### 3.1.1. L'indice de boue

Le test de l'indice de boue est utilisé pour apprécier l'aptitude d'une boue à la décantation.

Cet indice représente le volume occupé par un gramme de boue après trente minutes de décantation statique dans une éprouvette d'un litre à paroi transparente graduée. Noté IB, il est défini par la formule suivante :

$$IB = \frac{VD_{30}}{Cep}$$

$VD_{30}$  = volume de boue décanté en trente minutes (en ml).

Cep. = concentration en matières en suspension dans l'éprouvette (en g/l).

*Le test n'est validé que si le volume décanté est inférieur à 300 ml. Lorsque la décantation des boues est médiocre, il devient impératif de pratiquer le test sur des boues diluées par l'eau épurée (le calcul de l'indice tiendra compte du facteur de dilution).*

Le protocole expérimental est détaillé à l'annexe 1. Le test lui-même, de mise en œuvre facile, est obligatoirement réalisé sur le terrain. Le calcul de l'indice exige la mesure de la concentration en MES qui doit être effectuée au laboratoire.

Les indices faibles (< 100 ml/g) correspondent à des boues qui sédimentent facilement; en revanche, les boues décantant difficilement ont des indices élevés (> 200 ml/g).

De nombreux résultats illustrent la relation entre l'indice et la densité de germes filamenteux (fig. 12). Les indices supérieurs à 200 ml/g (foisonnement) correspondent à des développements importants de filaments dans les boues (longueur >  $10^7$   $\mu\text{m/ml}$ ).

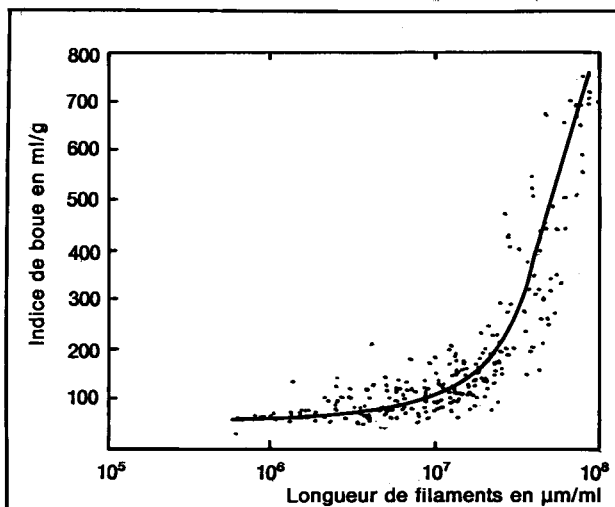


Figure 12 : Relation indice de boue et longueur totale des filaments (d'après PALM et coll., 1980).

L'indice de boue est un outil précieux, qui a de multiples applications au niveau de la station d'épuration :

- suivi préventif de l'évolution de la qualité des boues,
- mise en évidence d'un foisonnement,
- appréciation de l'effet des solutions techniques mises en œuvre pour améliorer la décantabilité de la boue,
- vérification des performances du décanteur en service (fig. 3) après prise en compte de la concentration des boues et du débit alimentant l'ouvrage,
- utilisation a priori pour le dimensionnement de la surface du clarificateur,
- aide à la gestion de la production de boue sur les petites stations dans la mesure où l'indice reste stable dans le temps,
- caractérisation des boues en vue de leur déshydratation.

### 3.1.2. L'observation microscopique

L'étude microscopique d'une boue activée est indispensable pour faciliter la compréhension du fonctionnement d'une station d'épuration. En effet, la dynamique des populations de microorganismes constituant le peuplement des boues est fortement corrélée aux conditions d'alimentation, de fonctionnement et de gestion des installations.

Dans le cas de foisonnement, l'examen microscopique révèle des microorganismes filamenteux attachés ou non aux agglomérats bactériens qui forment de véritables réseaux. Les filaments ont une très grande surface spécifique, « allègent » le floc et augmentent son volume apparent. Ils confèrent à la boue des conditions de décantation médiocres.

On peut procéder à l'observation de ces microorganismes en utilisant un microscope de faible grossissement (100 à 200 X), mais il est difficile dans ces conditions d'identifier les germes. Il est souhaitable de ne pas se limiter à l'observation des seuls filaments mais de prendre en compte également les caractéristiques du floc et de la microfaune.

Ces premières investigations de terrain peuvent être réalisées sans trop de difficultés et apporteront des enseignements indispensables sur la nature des floccs, la morphologie des germes filamenteux, la microfaune.

En revanche, l'identification précise des filaments réclame une expérience plus affirmée, de bonnes connaissances sur les critères de détermination de ces microorganismes. Pour de bonnes conditions de détermination il est nécessaire de disposer d'un microscope

performant, équipé en contraste de phase et d'objectifs à fort grossissement (> 1 000 X).

L'identification des germes est capitale dans la mesure où les actions à engager pour maîtriser la croissance filamenteuse sont spécifiques et doivent être adaptées au type de filament présent.

## 3.2. Les micro-organismes filamenteux

### 3.2.1. Les formes de croissance bactérienne

Pour faciliter la compréhension des mécanismes qui conduisent à des déséquilibres d'ordre biologique, il convient de raisonner en tenant compte de la compétition biologique instaurée entre les différentes communautés participant à l'épuration des eaux. Dans les boues activées, cette compétition se traduit par la cohabitation de trois formes de croissance bactérienne :

- La croissance dispersée (photo 6)



Photo 6 : Structure microscopique de la boue (fond noir 125 X).

On la rencontre habituellement dans des bassins où les concentrations en substrat sont très faibles ou très élevées. Dans ces conditions, les bactéries colonisent le plus grand volume de liquide possible. Leur membrane porte des charges électriques négatives qui facilitent la dispersion. Le peuplement se limite aux bactéries libres, les protozoaires sont rares (peu de prédation). Il s'agit le plus souvent de boues très jeunes (charge massive élevée) à faibles performances épuratoires.

— La croissance floculée (photo 7)

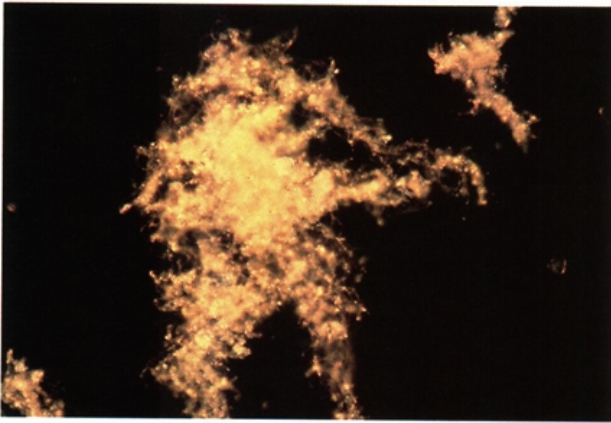


Photo 7 : Structure microscopique de la boue (fond noir 125 ×).

Cette forme domine dans les stations à boues activées fonctionnant normalement, elle représente l'état normal d'une boue et garantit un traitement satisfaisant. La teneur en substrat au voisinage du floc est suffisante pour assurer un taux de croissance optimum des germes floculés. Les bactéries synthétisent les protéines indispensables au développement cellulaire et stockent rapidement une forte proportion de substrat sous forme de réserves composées de sucres polymérisés (exopolysides). Ces réserves interviennent dans la constitution du mucilage, sorte de gangue entourant la bactérie, qui joue un rôle majeur dans la floculation. Le mucilage modifie la charge électrique superficielle des bactéries, facilitant ainsi leur agglomération ; il participerait également à la cohésion des particules par effet de cimentation (phénomènes physico-chimiques d'adsorption).

— La croissance filamenteuse (photo 8)

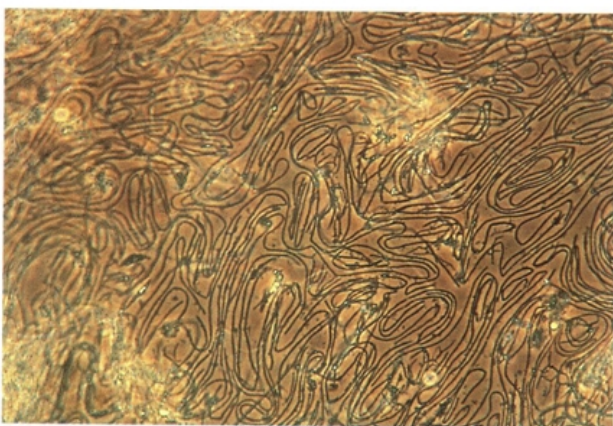


Photo 8 : Structure microscopique de la boue (contraste de phase 500 ×).

La croissance filamenteuse intervient à partir d'un germe fixé au floc ou libre. La multiplication de « cellules » se fait suivant une direction privilégiée et donne lieu à la formation de filaments qui confèrent à la boue sa structure particulière.

Si ces germes sont peu nombreux, ils ne posent pas de problème, bien au contraire, puisqu'ils participent à l'épuration au même titre que les bactéries du floc (ou les bactéries libres). Ils ont toujours un effet bénéfique sur la qualité de l'eau interstitielle dans la mesure où ils affinent la filtration de l'eau à travers le lit de boue du décanteur secondaire.

En revanche, lorsque la densité de filament est forte ( $> 10^7$   $\mu\text{m}/\text{ml}$ ), l'aptitude à la décantation diminue considérablement. La séparation entre l'eau épurée et la boue devient alors très délicate. Des pertes de boue peuvent se produire et dégrader notablement la qualité du rejet.

Cependant les propriétés de décantation ne dépendent pas uniquement de la densité de filaments mais également des espèces en cause. Par exemple, la présence de *Nocardia* sp., filament à ramifications nombreuses et courtes, n'implique pas de dégradation notable de la décantabilité des boues. En revanche, une densité moyenne de *Sphaerotilus natans* (long filament large) dans des boues très organiques conduira rapidement à des indices élevés.

### 3.2.2. L'identification des germes filamenteux

Les modalités pratiques et les critères utilisés pour l'identification des germes sont consignés à l'annexe n° 2.

Il est important de procéder à l'identification des germes filamenteux car leur développement est fortement dépendant des conditions du milieu (nature du substrat, oxygénation,...). En conséquence, une identification précise des germes apportera des renseignements déterminants sur l'origine du foisonnement ce qui permettra ensuite de décider des moyens d'action à engager pour juguler le phénomène.

De plus, la qualité de la décantation des boues varie avec les caractéristiques morphologiques des filaments (raides ou souples, longs ou courts).

La mise au point de méthodes d'identification adaptées aux boues activées ne s'est pas faite sans difficultés car les règles classiques pratiquées par les microbiologistes n'étaient pas directement transposables aux boues actives :

- isolement des germes difficile compte tenu de l'hétérogénéité des boues,
- polymorphisme des souches,
- techniques exigeant un long délai, peu compatible avec la gestion courante d'une station.

Une avancée spectaculaire a été faite au cours de la dernière décennie par l'équipe du professeur EIKELBOOM. Après avoir observé en détail 1200 échantillons de boues prélevées dans 220 stations d'épuration (dont 40% touchées par le foisonnement), cette équipe a élaboré une clé d'identification fondée sur l'examen de critères morphologiques (taille, ramifications,...) complété par quelques colorations et tests simples (Gram, Neisser, test S). La clé comporte une vingtaine de types morphologiques répertoriés pour la plupart à l'aide de numéros, dans l'attente de données plus complètes sur leur physiologie.

En 1986, JENKINS et Coll. ont publié un ouvrage similaire, largement inspiré des résultats précédents, qui apporte des détails complémentaires sur les caractéristiques des différents germes.

L'annexe 2 fournit une synthèse des connaissances en la matière, en présentant une méthode d'observation des principaux microorganismes filamenteux basée sur leurs caractéristiques morphologiques (PUJOL, 1987).

La cohérence des relations entre critères morphologiques et conditions de fonctionnement des stations, associée à la simplicité de la méthode d'observation, renforce l'intérêt de ce type d'investigation.

### 3.2.3. Relations entre les microorganismes et leur milieu

La sélectivité du milieu boues activées, d'autant plus forte que les boues sont en état de

foisonnement, explique le nombre limité (généralement inférieur à trois) de types morphologiques présents dans un échantillon donné.

Diverses enquêtes entreprises en France et à l'étranger portent sur l'identification des filaments. Elles révèlent une dizaine de types morphologiques fréquents : *Microthrix parvicella*, type 0041, type 0675, type O21N...

En l'état actuel des connaissances, qui s'affinent continuellement, des relations simples ont été établies entre le développement des principaux filaments et les conditions de fonctionnement des stations (tableau 3).

## 3.3. Causes et mécanismes du foisonnement

### 3.3.1. Les causes du foisonnement

A partir des connaissances acquises, une liste des principaux facteurs favorisant le foisonnement peut être dressée, elle concerne :

- la nature de la pollution reçue,
- les paramètres technologiques du procédé, principalement la charge massique,
- la concentration en oxygène dissous dans le bassin d'aération,
- la concentration en substrat soluble dans le bassin d'aération,
- le mode d'écoulement de l'effluent dans le bassin d'aération.

#### 3.3.1.1. Composition des eaux résiduaires

- **Richesse en hydrates de carbone** (sucres, alcools,...)

Les hydrates de carbone, notamment les substrats glucidiques facilement assimilables (poids moléculaire faible), favorisent le déve-

Origine présumée	Filament dominant
Faible charge massique-mélange intégral	<i>Microthrix parvicella</i> Types 581, 0041, 0675, 0092, 0961
Moyenne à forte charge massique	Types 1701, 021N <i>Sphaerotilus natans</i>
Effluents septiques ou riches en composés soufrés réducteurs	<i>Thiothrix sup.</i> , <i>Beggiatoa</i> Types 021N, 0961
Déséquilibres en nutriments	<i>Sphaerotilus n.</i> , <i>Thiothrix sp.</i> Types 021N, 0961
Effluents acides pH < 6	Champignons

*Remarque* : Les déficits en oxygène ainsi que les déséquilibres nutritionnels marqués (N,P) sont de nature à favoriser le développement de la plupart de ces germes.

Tableau 3 : Relations filaments - caractéristiques sommaires des stations d'épuration.



loppement de certains microorganismes filamenteux (*Sphaerotilus natans*, type 1701,...) à forte croissance cytoplasmique (filaments larges > 1 µm et « cellules » longues : 3 à 5 µm).

#### — Carences en nutriments (N, P)

Les déficits en azote, phosphore, nutriments indispensables à la croissance bactérienne, ont été mis en cause à de multiples reprises. Les seuils de ces différents éléments ne sont pas déterminés précisément. Les données bibliographiques se limitent en fait à rappeler le rapport classique définissant les proportions minimales d'azote et de phosphore nécessaires pour dégrader la pollution carbonée :  $DBO/N/P = 100/5/1$ .

#### — Rôle des matières en suspension

Un recensement des cas de foisonnement réalisé en République Fédérale d'Allemagne (1982) montre que les stations équipées de décanteurs primaires sont beaucoup plus sensibles au foisonnement : 70% des installations de ce type connaissent de sérieuses difficultés pendant au moins deux mois par an.

Ces données ont été confirmées par plusieurs observations complémentaires qui témoignent du rôle néfaste du décanteur primaire considéré comme facteur aggravant du foisonnement (PUJOL, 1987 ; FORTIN, 1986).

En conclusion, les matières en suspension ont un effet doublement positif sur la boue :

- amélioration de la structure et de la cohésion du floc qui décante plus facilement,
- meilleure accessibilité et augmentation de la disponibilité en substrat pour les germes du floc.

#### — Composés soufrés réducteurs

Les effluents réducteurs septiques (après un long temps de séjour dans le réseau), ou fermentescibles (agro-alimentaires) contiennent souvent des concentrations non négligeables en soufre réduit qui sont à l'origine de foisonnements particuliers. Les germes observés (*Thiothrix sp.*, *Beggiatoa*) utilisent le soufre réduit dans leur métabolisme.

#### 3.3.1.2. La charge massique

La charge massique est un paramètre important du fonctionnement des stations à boues activées, elle conditionne en particulier l'âge des boues. Elle est définie par le rapport entre le poids de la matière organique à traiter (exprimée en kgDBO/j) et la quantité de « matière vivante » présente dans le système (exprimée par convention en kg de MVS).

Plusieurs publications mettent en évidence une relation privilégiée entre indice de boue et charge massique ; mais dans l'absolu, ce type de relation est source de confusion et de contradiction comme l'atteste la figure 13. A partir d'une charge massique donnée, il n'est pas possible de déduire un ordre de grandeur de l'indice de boue correspondant.

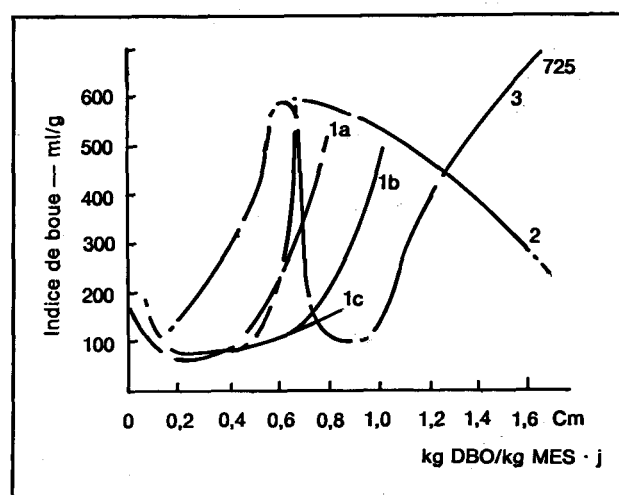


Figure 13: Relations Indice de boue-Charge massique d'après CHUDOBA (1985).

#### 3.3.1.3. L'oxygène dissous

Les travaux sur les relations entre l'état d'aération de la boue et le foisonnement démontrent les effets négatifs de la sous-aération des boues.

En règle générale, les carences en oxygène dissous constituent un facteur aggravant quelle que soit la charge massique.

#### 3.3.1.4. Mode d'écoulement des effluents dans le bassin d'aération

Les modes d'écoulement en bassin d'aération se rapprochent plus ou moins de 2 types limites :

— **le mélange intégral** qui entraîne une dilution immédiate du substrat dès son introduction dans le bassin. Les concentrations sont identiques en tout point du bassin d'aération,

— **l'écoulement piston** que l'on peut assimiler à une tranche d'eau qui traverse longitudinalement le bassin. Il y a alors création d'un gradient de concentration en substrat de l'entrée jusqu'à la sortie du bassin.

Diverses études effectuées sur des stations en service démontrent que les configurations de bassin proches du mélange intégral affectent négativement la décantabilité des boues (fig. 14) ; l'écoulement piston s'avère donc

préférable. Il y a lieu d'indiquer que la majorité des stations d'épuration françaises sont conçues pour fonctionner dans des conditions d'écoulement proche du mélange intégral.

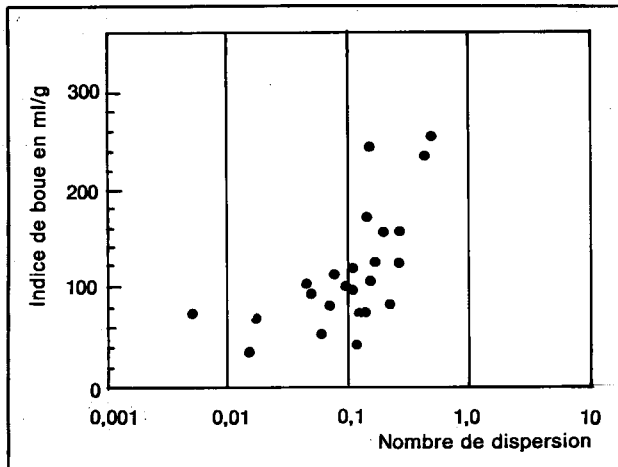


Figure 14 : Relation indice de boue et nombre de dispersion d'après CHAMBERS et TOMLINSON (1982).

### 3.3.2. Les mécanismes explicatifs

#### 3.3.2.1. Morphologie des germes filamenteux

Les germes filamenteux s'apparentent à de longs filaments dotés d'une importante surface d'échange avec le liquide interstitiel. En revanche, les flocs sont constitués de germes agglomérés à diverses particules qui leur confèrent un ratio surface/volume inférieur à celui des formes filamenteuses.

Cette plus grande faculté d'échange avec le milieu environnant représente un atout indiscutable pour les germes filamenteux lorsque la nourriture est disponible sous forme dissoute ou qu'un élément devient facteur limitant (concentration trop faible dans le micro-environnement).

La compétition entre espèces, qui caractérise tout milieu vivant, permet de proposer une explication au développement privilégié des formes filamenteuses lorsque :

- la concentration en substrat est faible dans le micro-environnement bactérien (mélange intégral-faible charge massique) ;
- les teneurs en azote, phosphore au voisinage des flocs sont insuffisantes ;
- les besoins en oxygène dissous ne sont pas entièrement satisfaits.

#### 3.3.2.2. Aspects particuliers du métabolisme

##### — Métabolisme des substances de réserves :

Ce point concerne les mécanismes d'implantation de filaments dans le cas d'effluents riches en glucides, avec carence en azote ou en oxygène dissous dans les boues.

Les composés sucrés, facilement assimilables, sont rapidement transformés en substances de réserves stockées dans le mucilage (enveloppe entourant la bactérie). L'accumulation excessive de réserves conduirait à un développement important du mucilage qui freinerait le transfert de l'oxygène dissous vers l'intérieur des flocs.

Les travaux de MORFAUX et ALBAGNAC (1979) indiquent que la prolifération de certaines formes filamenteuses peut se produire dans des conditions de milieu impliquant la synthèse et l'accumulation irréversible des substances de réserve (faible concentration en oxygène dissous, richesse en substrat carboné facilement assimilable, carence en azote). Ces auteurs expliquent le phénomène par l'analyse des bilans énergétiques des différentes voies de synthèse des réserves glucidiques.

En conditions limitantes, les microorganismes filamenteux seraient favorisés et se développeraient en raison d'un métabolisme plus économique au plan énergétique.

##### — Métabolisme des composés soufrés :

L'utilisation des composés soufrés comme source énergétique fournit l'explication de certains foisonnements où des germes autotrophes du soufre sont identifiés (*Thiothrix sp.*, *Beggiatoa*, type 914).

Ces cas sont observés lorsque l'effluent est septique ou que le milieu est riche en composés soufrés réduits.

#### 3.3.2.3. Taux de croissance et dynamique des populations

La différenciation des taux de croissance entre les germes filamenteux et les non filamenteux exerce une pression sélective sur la dynamique des populations bactériennes.

Ces taux varient en effet en fonction de la concentration en nourriture (substrat) (fig. 15).

Pour les faibles concentrations en substrat présentes dans le micro-environnement bactérien, la croissance des germes filamenteux est supérieure à celle des germes floculants (courbe A). En revanche, pour des valeurs supérieures à E, la compétition avantage les germes du floc (courbe B).

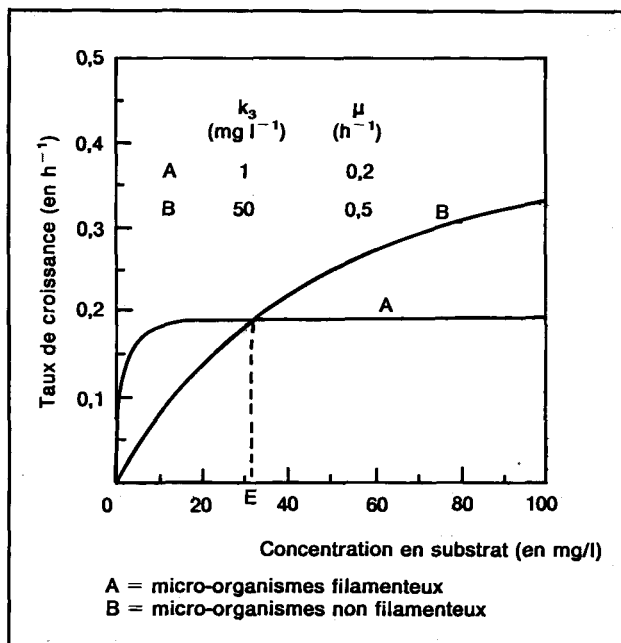


Figure 15 : Différenciation des taux de croissance d'après CHUDOBA et coll., 1973 II).

Remarque : Des études portant sur l'analyse des taux de croissance en fonction de la concentration en oxygène dissous ont abouti à des conclusions similaires : les formes filamenteuses sont plus compétitives pour de faibles concentrations en oxygène dissous au voisinage du floc.

On trouve ici une explication logique à de nombreux cas de foisonnement dont l'origine peut être rapprochée de :

- faibles concentrations en substrat (nourriture, oxygène) au voisinage du floc (stations à faible charge, à mélange intégral, présence d'un décanteur primaire),
- la dilution des effluents, consécutive à l'infiltration d'eaux parasites claires dans les collecteurs.

### 3.3.3. Conclusion

Les éléments précédents permettent de définir les principaux atouts dont disposent les divers germes filamenteux face aux germes du floc. Ces avantages sont liés :

- au rapport surface/volume en cas de facteur limitant (nutritionnel, oxygénation,...) ;
- à leur métabolisme (substrat riche en composés sucrés ou soufrés),
- à leur taux de croissance supérieur en cas de carence nutritionnelle au niveau du micro-environnement bactérien (stations à faible charge).

En règle générale, les conditions de milieu très sélectives impliquent la prolifération de germes filamenteux dans les boues activées.



Sont présentés dans ce chapitre les principaux moyens d'action actuellement utilisés et qui ont démontré leur efficacité pour résoudre les problèmes de foisonnement.

## 4.1. Conception et Aménagement des ouvrages

### 4.1.1. Techniques à gradient de charge

On distingue deux types de configurations possibles (fig.16). Elles consistent à créer une zone à forte charge en tête (1) de station ou un gradient de charge dans le bassin d'aération (2) pour stimuler la croissance des germes non filamenteux.

#### 4.1.1.1. La technique de la zone de contact

Cette technique consiste à réaliser un mélange déterminé de boue (recirculée en général) et d'effluent à traiter dans une zone de faible volume située à l'amont immédiat du bassin d'aération. Ainsi, on accroît artificiellement la teneur en substrat disponible pour les microorganismes et la croissance des germes non filamenteux est favorisée.

Cette technique a été expérimentée à plusieurs reprises sur le territoire français ainsi qu'à l'étranger. Elle offre une grande souplesse de mise en œuvre. Elle a donné des résultats satisfaisants pour traiter les cas de foisonnement suivants :

- station d'épuration à faible charge massique,
- filaments dominants associés à une carence nutritionnelle au voisinage du floc,

Les paramètres de fonctionnement de la zone de contact dépendent des résultats des essais de biosorption : mesure de la capture du substrat par les microorganismes.

Cette technique simple est détaillée dans la fiche technique n° 1.

#### 4.1.1.2. Les systèmes compartimentés

Dans ces installations, les conditions hydrauliques tendent vers un mode d'écoulement piston, créant ainsi un gradient de concentration en substrat de l'entrée à la sortie du bassin d'aération. Leur domaine d'application concerne notamment les stations d'épuration de forte capacité.

Les conditions de mise en œuvre sont différentes selon que l'on opte pour :

- un bassin compartimenté : le nombre de compartiments est à déterminer sur la base

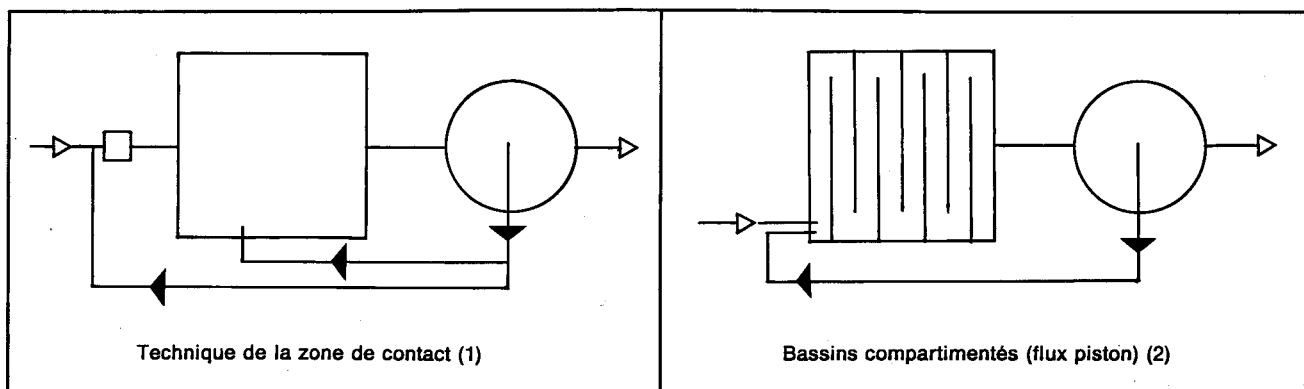


Figure 16 : Schéma de principe des techniques à gradient de concentration.



— Pour les foisonnements occasionnés par des germes autotrophes du soufre (*Thiothrix* sp.,...), il est souhaitable d'oxyder les composés réducteurs présents dans l'effluent immédiatement à l'amont du bassin d'aération s'il n'est pas possible de les éliminer à la source (industries notamment).

#### **4.2.2. Complémentation en nutriments (N ou P)**

Cette technique est utilisée dans les cas de carences très marquées, déjà apparentes au vue des caractéristiques analytiques des effluents à traiter (en règle générale d'origine agro-alimentaire et riches en carbone).

L'ajout de nutriments est réalisé en tête de station sous forme d'acide phosphorique ou de phosphates et/ou d'azote ammoniacal ou d'urée. Cette solution peut être complémentaire à tout autre procédé biologique de maîtrise du foisonnement (zone de contact, etc.).

#### **4.2.3. Lestage des boues**

Il a précédemment été évoqué que la présence d'un décanteur primaire peut constituer un facteur aggravant du foisonnement. L'introduction d'une fraction de boues primaires dans les boues activées est susceptible d'améliorer provisoirement la qualité de la boue. Ce « lestage » des boues activées a été utilisé avec succès sur des stations d'épuration à variation de charge confrontées à des problèmes de foisonnement. Cependant, cette solution n'est qu'un palliatif et elle ne doit être utilisée que sur une courte période (à terme risque de surcharge,...).

Le lestage peut également être réalisé par adjonction de produits chimiques dans les boues (voir paragraphe suivant).

#### **4.2.4. Les techniques chimiques**

Leur principe repose sur l'ajout de réactifs dans les boues. Ils entraînent une modification de la structure microscopique de la boue (rupture des filaments, formation d'hydroxydes, ...).

Les conditions de mise en œuvre de ces techniques (doses, points d'injection) varient d'une station à l'autre, aussi est-il difficile d'en tirer des règles générales. De plus, il est hasardeux de prévoir à l'avance l'efficacité de ces solutions. Enfin il faut savoir que les résultats

obtenus ne peuvent être définitifs, dans la mesure où ces techniques n'agissent pas sur les causes du foisonnement et que bien souvent les apports de réactifs ne peuvent être permanents eu égard à leur coût.

Les produits utilisés sont de deux types :

##### **4.2.4.1. Les agents oxydants**

— Le chlore et ses composés ( $\text{Cl}_2$  et dérivés) :

L'ajout de doses contrôlées de chlore permet de limiter la croissance des germes filamenteux mais cette solution nécessite un suivi particulièrement attentif ; le chlore étant toxique pour l'ensemble des microorganismes.

Cette solution toujours efficace lorsqu'elle est bien conduite doit cependant être réservée aux installations de capacité importante compte tenu des contraintes qu'elle implique.

La procédure d'utilisation du chlore est détaillée dans la fiche technique n° 2.

— L'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) :

Les conditions de mise en œuvre sont analogues à celles du chlore mais les doses sont plus élevées que pour le chlore et peuvent atteindre 200 mg d' $\text{H}_2\text{O}_2$ /litre au point d'injection. Si la manipulation de l'eau oxygénée est moins contraignante que celle du chlore, le temps de contact doit être plus long (environ 1/4 d'heure) et le prix de l'eau oxygénée est supérieur. Ce moyen d'action est notamment utilisé en Grande-Bretagne.

— L'ozone ( $\text{O}_3$ ) :

L'action de l'ozone est identique et a donné lieu à des essais concluants en laboratoire à des doses de 0,5 à 1 mg/g de MVS (sur les boues de recirculation). Les conditions de mise en œuvre sur le terrain restent à préciser (COLLIGNON, 1988).

##### **4.2.4.2. Les agents floculants**

Les réactifs utilisés sont le plus souvent des sels de fer qui facilitent l'agglomération des floccs sans être toxiques pour les microorganismes aux doses normalement préconisées.

Ils participent à l'élimination partielle du phosphore présent dans les eaux à traiter. Cependant, l'adjonction permanente de réactifs induit un accroissement substantiel des charges financières d'exploitation (équipements complémentaires, achats de réactifs, traitement des boues,...).

Leur efficacité n'est pas garantie, il est souhaitable de réaliser des essais préalables.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'emploi du sulfate ferreux  $\text{FeSO}_4$  (floculant le

moins onéreux) sur certains filaments (types 0041, 1701, 961, *Sphaerotilus natans*) pour des doses variant entre 20 et 50 mg de fer/l d'eau usée.

Quelques résultats positifs ont également été enregistrés en utilisant la chaux (ex. : inhibition du type 021N pour des doses de 11 g/m<sup>3</sup> d'eau usée).

Les autres réactifs (sulfate d'alumine, chlorure ferrique, clairtan,...) nettement plus onéreux ne sont pas à préconiser pour lutter contre le foisonnement dans la mesure où leur efficacité n'est pas supérieure aux produits déjà évoqués.

Il faut mentionner que les conditionnements se présentant sous forme liquide sont plus faciles à mettre en œuvre.

#### 4.2.5 Techniques mécaniques

##### \* La centrifugation :

La centrifugation d'une fraction des boues recirculées est susceptible de provoquer la rupture des réseaux filamenteux, la décantation des boues peut s'en trouver améliorée.

Des essais pilote sont nécessaires pour déterminer la fraction des boues à centrifuger afin de ne pas dépasser l'effet recherché et provoquer un phénomène de défloculation. Le coût énergétique de ce procédé reste à évaluer au cas par cas (solution expérimentée en RFA).

##### \* Création d'un régime turbulent :

Cette technique, brevetée (Brevet SAPS n° 8816612) consiste à faire passer les boues de recirculation ou d'aération dans une boucle indépendante à travers un émulseur (Venturi avec aspiration d'air). La turbulence provoquée produit la désagrégation des filaments en limitant le foisonnement.

### 4.3. Choix des moyens d'action

Devant la complexité des problèmes relatifs au foisonnement et face à la diversité des options techniques qui peuvent être utilisées, une démarche pragmatique est nécessaire.

Cette démarche doit s'appuyer sur les données techniques recueillies dans le cadre

d'une étude préalable comprenant deux phases principales :

1 - caractérisation précise du problème : (diagnostic du foisonnement, type de filaments,...) ;

2 - étude approfondie de la station afin de mettre en évidence les origines du phénomène et d'éventuels facteurs aggravants (conception, paramètres de l'exploitation,...).

Malgré les délais inévitables qu'ils engendrent, ces examens sont les garants d'un choix technique adapté.

Ce choix doit également tenir compte de l'acuité du phénomène et de son caractère permanent ou occasionnel :

— les problèmes aigus mais temporaires militent plutôt en faveur de solutions curatives à action « réputée rapide » : réactifs chimiques notamment ;

— les problèmes chroniques nécessitent des solutions plus « douces », plus fiables de type préventif : zone de contact par exemple.

En général, on constate que la détérioration de l'indice n'est qu'exceptionnellement brutale, et l'expérience montre que de nombreuses stations souffrent d'un foisonnement latent permanent. Les manifestations aiguës ne constituent en fait qu'une amplification du phénomène lié à la variation brutale d'un des paramètres de fonctionnement de la station (réglages déficients...).

La plupart des cas de foisonnement sont donc à considérer comme chroniques et en conséquence, il est souhaitable de proposer prioritairement des solutions souples, à faible contrainte d'exploitation, adaptables à différentes configurations de station ; même si leur efficacité n'est pas immédiate, il est important qu'elle soit durable.

C'est dans cet esprit qu'est proposé le tableau 4. Il classe les principales options techniques possibles en fonction des origines présumées du problème et des caractéristiques de la charge massique de la station.

Cette démarche n'exclut pas le recours à d'autres solutions (chloration,...), notamment pour des interventions ponctuelles qui peuvent se révéler indispensable dans les cas les plus aigus. En revanche, il y a lieu de ne pas sous estimer leurs contraintes d'utilisation (coût, maintenance). Elles nécessitent une grande rigueur dans les dosages et dans les modalités d'ajout ; notamment pour l'emploi des oxydants qui ont un caractère toxique vis-à-vis de la boue activée dans son ensemble.



Type de station	Origine supposée du foisonnement	Facteur aggravant	Dominance du filament	Solution technique envisageable
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Faible charge massique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Carence nutritionnelle peu marquée</li> <li>● Forte carence nutritionnelle (industries)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Déficit en oxygène</li> <li>● Dilution des effluents</li> <li>● Décanteur primaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Type 0041, 0092, 0581, 0675 <i>Microthrix parvicella</i></li> <li>● Type 0961, 021N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Zone de contact</li> <li>● Zone de contact + complémentation en nutriments</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Moyenne ou forte charge massique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Déséquilibres nutritionnels</li> <li>● Variations de charge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Déficit en oxygène</li> <li>● Substrat riche en hydrate de carbone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Sphaerotilus natans</i> Type 021N, 1701, 1863</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Complémentation en nutriments</li> <li>● Suroxygénation des boues</li> <li>● Extension de la station</li> <li>● Mise en place d'un premier étage à forte charge</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Indifférenciée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Composés soufrés réduits dans l'effluent</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Type 021N <i>Thiothrix</i>, <i>Beggiatoa</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Oxydation des composés soufrés en amont du traitement</li> <li>● Suraération des boues</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Industrielle (agro-alimentaire)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Substrat riche en hydrate de carbone</li> <li>● Carence nutritionnelle et déséquilibre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Surchage ou sous-aération</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <i>Sphaerotilus natans</i></li> <li>● Type 021N, 1701, 1863</li> <li>● Type 0041, 0961, 021N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Lit bactérien en tête</li> <li>● Suraération</li> <li>● Complémentation en nutriments</li> <li>● Zones de contact</li> </ul>

Tableau 4 : Foisonnement des boues : choix des solutions techniques.

Remarques : — Si plusieurs germes cohabitent, il convient d'en tenir compte dans les solutions techniques préconisées.

— Les conditions d'exploitation déficientes constituent dans tous les cas un facteur aggravant.



# Conclusion

Le foisonnement des boues constitue un problème biologique majeur qui affecte en France 25% des stations d'épuration fonctionnant selon le principe des boues activées.

Il se traduit par une altération de la décantabilité des boues entraînant une diminution des capacités hydrauliques de traitement.

L'optimisation du fonctionnement de ces installations exige de réduire la croissance filamenteuse responsable du phénomène de foisonnement.

Les connaissances acquises au cours des deux dernières décennies ont apporté des enseignements essentiels sur :

- l'identification des germes filamenteux,
- les mécanismes qui président à leur développement,
- les relations entre germes filamenteux et conditions de fonctionnement des stations.

L'exploitation de ces résultats a permis l'émergence de nouvelles techniques pour maîtriser le foisonnement des boues. Cependant, compte tenu de la diversité des situations et des moyens d'actions possibles, il convient de se garder de toute généralisation dans l'application d'un remède. Le problème ne

connait en effet pas de solution universelle dans la mesure où le terme de foisonnement recouvre des origines diverses qui se manifestent au niveau des peuplements par des microorganismes de type différent.

Une approche pragmatique, au cas par cas, est indispensable ; elle doit nécessairement passer par :

- l'optimisation des réglages de la station,
- la connaissance des potentialités des différents ouvrages assurant le traitement,
- la caractérisation fine du foisonnement (type de filament notamment).

Le choix des moyens d'action dépendra pour une large part du germe identifié mais aussi de la gravité et de la périodicité du problème. Les solutions préconisées devront bien évidemment intégrer les contraintes techniques et économiques spécifiques de la station d'épuration.

Enfin, pour ce qui concerne les futures installations, il convient de prendre en compte cette notion de risque de foisonnement, par des dispositions constructives appropriées (dimensionnement plus large du clarificateur, mise en place d'une zone de contact,...).



## La zone de contact

### PRINCIPE

Le principe consiste à réaliser un mélange déterminé de boue (recirculée en général) et d'effluent à traiter dans une zone de faible volume située à l'amont immédiat du bassin d'aération (fig. 18). Ce mode d'alimentation accroît artificiellement la teneur en substrat disponible pour les bactéries et permet dans une certaine mesure de pallier un état de carence nutritionnelle au niveau du floc.

La zone de contact, dont le but reste l'amélioration de la décantation de la boue, exerce une pression sélective sur la compétition entre germes filamenteux et non filamenteux, à l'avantage de ces derniers.

### DOMAINE D'APPLICATION

Il concerne les stations d'épuration à faible charge massique recevant des effluents domestiques ou industriels. Pour ces derniers, les carences nutritionnelles notamment en N ou P ne doivent pas être trop prononcées ; si tel

est le cas, une complémentarité s'avère nécessaire.

### MISE EN ŒUVRE

La zone de contact est placée en tête du traitement : elle peut être réalisée en isolant une partie du bassin d'aération si sa configuration le permet, être aménagée au niveau des prétraitements (dans un dégraisseur par exemple), ou bien nécessiter la construction d'un ouvrage spécifique.

Dans tous les cas, le mélange doit impérativement être brassé en continu et de préférence aéré. L'utilisation des boues recirculées pour alimenter la zone de contact est habituellement retenue car leur concentration élevée permet de réduire les dimensions du bassin de contact. Il convient de mettre en place un circuit de pompage indépendant de la recirculation préexistante sur la station. En effet, les conditions de mélange n'exigent en général pas de ramener la totalité des boues dans la zone de contact, et de plus, un circuit spécifique permet de moduler les débits en fonction des flux à traiter (jour-nuit, accroissement de charge,...).

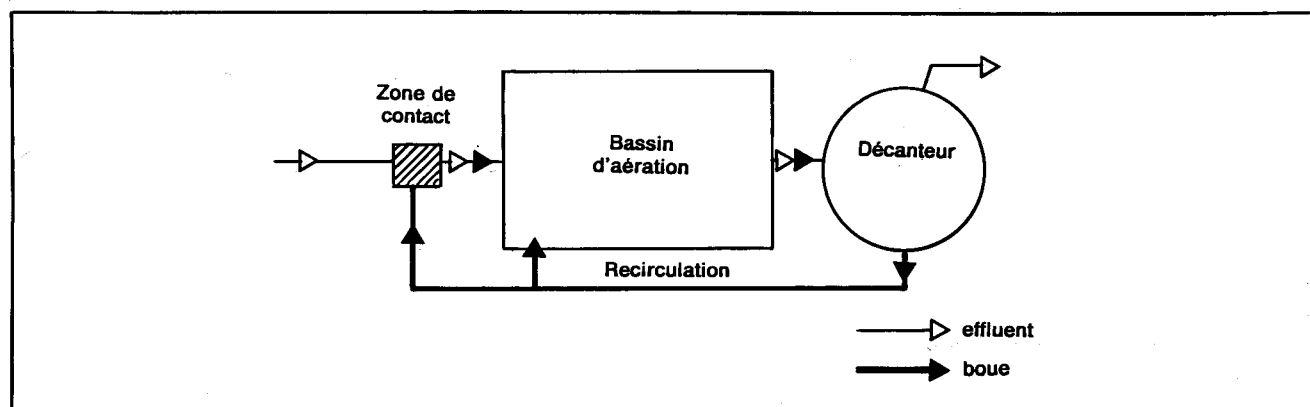


Figure 18 : Schéma de principe de la zone de contact.

## DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT

La zone de contact est caractérisée par deux paramètres : le temps de contact et la charge appliquée au niveau du floc. Ils sont définis au cas par cas, après réalisation de tests de biosorption (PUJOL, 1987) qui simulent le comportement nutritionnel des microorganismes face à un substrat donné, en l'occurrence la matière organique de l'effluent à traiter. Ces tests permettent de fixer le temps de contact et la charge à appliquer dans la zone de contact, paramètres indispensables pour déterminer le volume de la zone de contact ainsi que le débit de boue à admettre dans la zone.

Le choix du temps de contact a une incidence directe sur l'amplitude de la biosorption. Pour les stations d'épuration en service, il résulte d'un compromis entre les contraintes imposées par la station et les données relatives au phénomène de biosorption.

Ces essais doivent être complétés par des mesures de biosorption en fonction de la charge au niveau du floc.

D'une façon générale, il convient de retenir le temps de contact fournissant une biosorption aussi élevée que possible tout en restant dans un domaine de charge compatible avec le nécessaire dopage du micro-environnement bactérien. Il doit correspondre à un taux de capture de la DCO dissoute proche de 50%.

A titre indicatif, pour des effluents domestiques, des résultats satisfaisants ont été enregistrés pour des charges de l'ordre de 100 mg de DCO/g de MES et un temps de contact minimum de 10 minutes. Les biosorptions mesurées lors des essais préalables étaient d'environ 40 mg de DCO/g de MES pour des indices de boue de 200 ml/g.

## EFFICACITÉ

La figure 19 illustre les résultats obtenus sur les boues d'une installation qui a été équipée d'une zone de contact.

L'amélioration de l'indice est progressive, elle devient significative après 1,5 à 2 fois l'âge des boues.

La fiabilité est bonne sauf modification importante et durable des conditions d'alimentation (nouveaux raccordements sur le réseau,...). Si tel est le cas, il faut en tenir compte en ajustant les débits de boues recirculées à la nouvelle situation.

## EXPLOITATION

Le brassage doit être permanent pour éviter, entre autre, la sédimentation des particules en suspension et permettre les meilleures conditions de contact entre l'effluent et la boue.

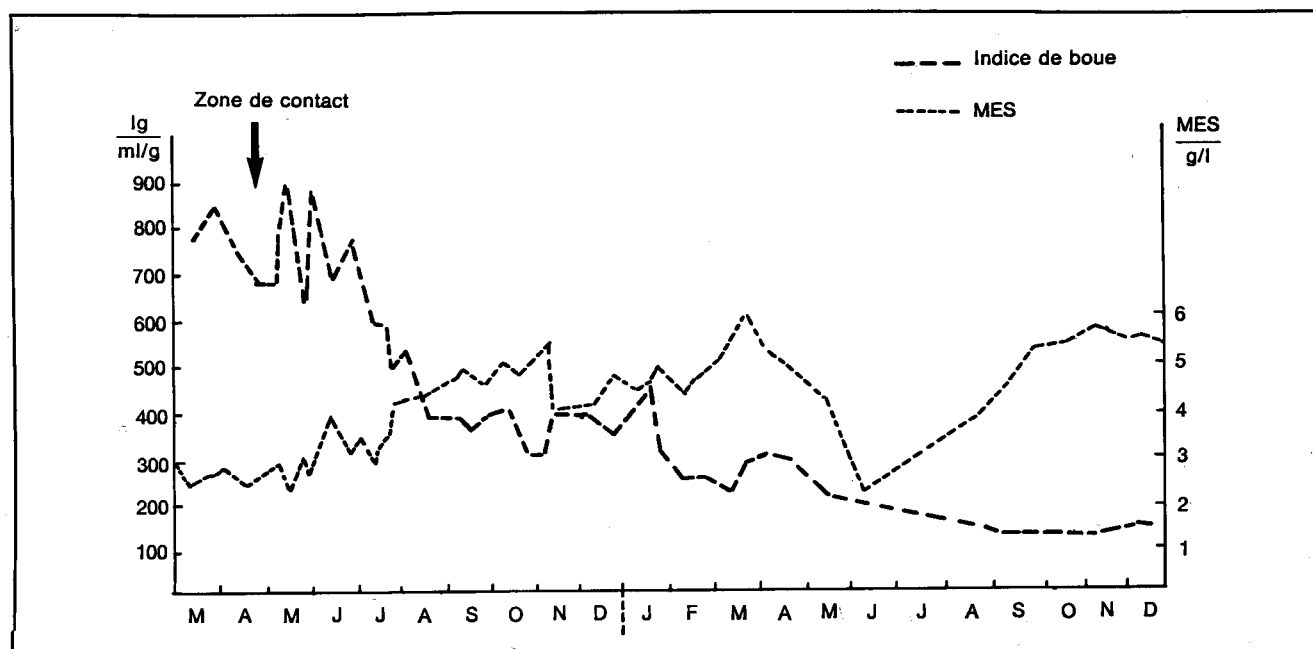


Figure 19 : Evolution de l'indice de boue après mise en service de la zone de contact.

La mise en service d'une zone de contact n'entraîne en principe pas de contraintes d'exploitation particulières. Il faut cependant signaler l'augmentation du volume de flottants en surface du bassin de contact, notamment pour des boues concentrées sous aérées. Il en est de même avec des boues « moussantes » (abondance de *Nocardia sp.* ou de *Microthrix parvicella*).

## **ASPECTS FINANCIERS**

L'investissement est réduit lorsque les ouvrages ou équipements sont réutilisables. Par rapport au coût global d'un projet de station, la création d'un ouvrage spécifique représente une plus value minime (environ 10% pour une station d'épuration de 2000 eq.hab.).

Compléments d'information sur cette technique dans PUJOL R. et CANLER J.P. (1990).





## Chloration des boues pour maîtriser le foisonnement

### PRINCIPE

Le chlore et ses dérivés sont des toxiques pour tous les microorganismes. Cependant, dans le cas de foisonnement, l'ajout contrôlé de faibles doses constitue un moyen très efficace pour limiter la croissance filamenteuse. Cet effet sélectif est à rapprocher du fait que les germes filamenteux sont le plus souvent libres dans le liquide interstitiel. Il semble qu'ils soient moins protégés que les bactéries « abritées » dans les grains de floc. Sous le microscope, l'effet du chlore se manifeste d'abord par une déformation des cellules dans le filament ; l'absence des cellules laissant apparaître des espaces clairs (transparence de la gaine) qui constituent les futures zones de rupture des filaments. Simultanément on observe la mort de bactéries libres et la disparition des points anguleux des grains de floc (contours blanchâtres dans un premier temps).

### CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

— La réaction entre le chlore et la matière organique (vivante ou non) est extrêmement rapide, aussi faut-il réaliser l'ajout en un point où le brassage est maximum. Les points généralement choisis se situent dans le bassin d'aération (près des aérateurs) ou sur le circuit des boues recirculées (bâche de recirculation,...).

— La présence de concentrations élevées d'ions  $\text{NH}_4^+$  dans l'eau interstitielle conduit à accroître les doses de chlore pour obtenir une efficacité sur les filaments (consommation du chlore par  $\text{NH}_4^+$  et formation de chloramines).

### MODALITÉS PRATIQUES

— L'opération exige un suivi régulier de l'indice de boue, de la qualité de l'eau traitée (notamment la turbidité) et des doses introduites.

— Les ajouts doivent être progressifs et croître jusqu'à l'obtention de résultats positifs sur les boues. Ensuite, la dose d'entretien dépendra de l'évolution de l'indice de boue.

— Les boues doivent transiter par le poste de chloration environ 3 fois par jour ce qui nécessite souvent une augmentation notable du volume de boue à recirculer. Dans l'hypothèse où cette fréquence de passage ne peut être atteinte, il est conseillé de multiplier les points de chloration plutôt que d'accroître les doses de chlore injecté.

### DOSES

La quantité de réactif déversée quotidiennement rapportée au poids de boue présent dans le système s'exprime en g de  $\text{Cl}_2/\text{kg}$  de MES.j. Ce paramètre sert aussi de base au calcul du coût du traitement.

Les doses les plus couramment admises sont de 2 à 6g de  $\text{Cl}_2/\text{kg}$  de MES traité.j. Les doses maximales mentionnées atteignent 15 g de  $\text{Cl}_2/\text{kg}$  MES.j (JENKINS et coll., 1986).

En règle générale, il conviendra de démarrer l'expérimentation aux environs de 2 g de  $\text{Cl}_2/\text{kg}$  de MES.j et d'accroître ensuite progressivement les doses. Il faut souligner que l'effet obtenu pour une même dose est inégal selon les stations d'épuration.

L'adaptation des doses de réactifs doit être impérativement basée sur l'observation des effets enregistrés afin d'éviter tout phénomène de surdosage qui aurait pour conséquence soit une dégradation sensible de l'activité biologi-

que, soit une déstructuration de la boue. La multiplication des points d'injection (bassin d'aération, recirculation) peut être une solution intéressante pour remédier à ces problèmes de surdosages, notamment dans les stations à faible charge massique.

Un suivi attentif de l'indice de boue et de la qualité de l'eau épurée couplé à des examens microscopiques réguliers sur les boues sont les meilleurs garants de l'efficacité de la chloration.

## **DOMAINE D'APPLICATION**

Solution efficace, la chloration des boues reste cependant une technique assez contraignante sur le plan de l'exploitation. C'est la raison pour laquelle l'utilisation de ce moyen d'action devrait en principe concerner les stations d'épuration de grande capacité sur lesquelles ces contraintes peuvent plus facilement être surmontées.

## Procédure expérimentale de l'indice de boue : IB

### Définition :

L'indice de boue (noté IB) représente le volume occupé par un gramme de boue après 30 minutes de décantation dans une éprouvette d'un litre à paroi transparente.

Il est calculé à partir de l'expression :

$$IB = \frac{VD_{30}}{Cep}$$

avec

IB : indice de boue (en ml/g).

$VD_{30}$  : volume de boue décanté après 30 minutes (en ml/l)

Cep : concentration en matières en suspension de l'échantillon homogénéisé introduit dans l'éprouvette (en g/l).

### Règles de mise en œuvre :

Il a été démontré à plusieurs reprises que la vitesse de décantation était influencée par le diamètre de l'éprouvette, la concentration et la décantabilité de la boue. (CTGREF, 1979).

Pour que l'indice soit un critère significatif d'appréciation de la décantabilité (ou qualité de la boue), il convient de limiter l'incidence des deux autres facteurs de variation (diamètre de l'éprouvette et concentration de la boue).

— Les éprouvettes d'un litre disponibles dans le commerce ont une ouverture de l'ordre de 8 à 8,5 cm. Cette valeur « standard » permet de s'affranchir des interférences liées au variation de diamètre.

— Il est indispensable de procéder à des dilutions pour supprimer l'influence de la

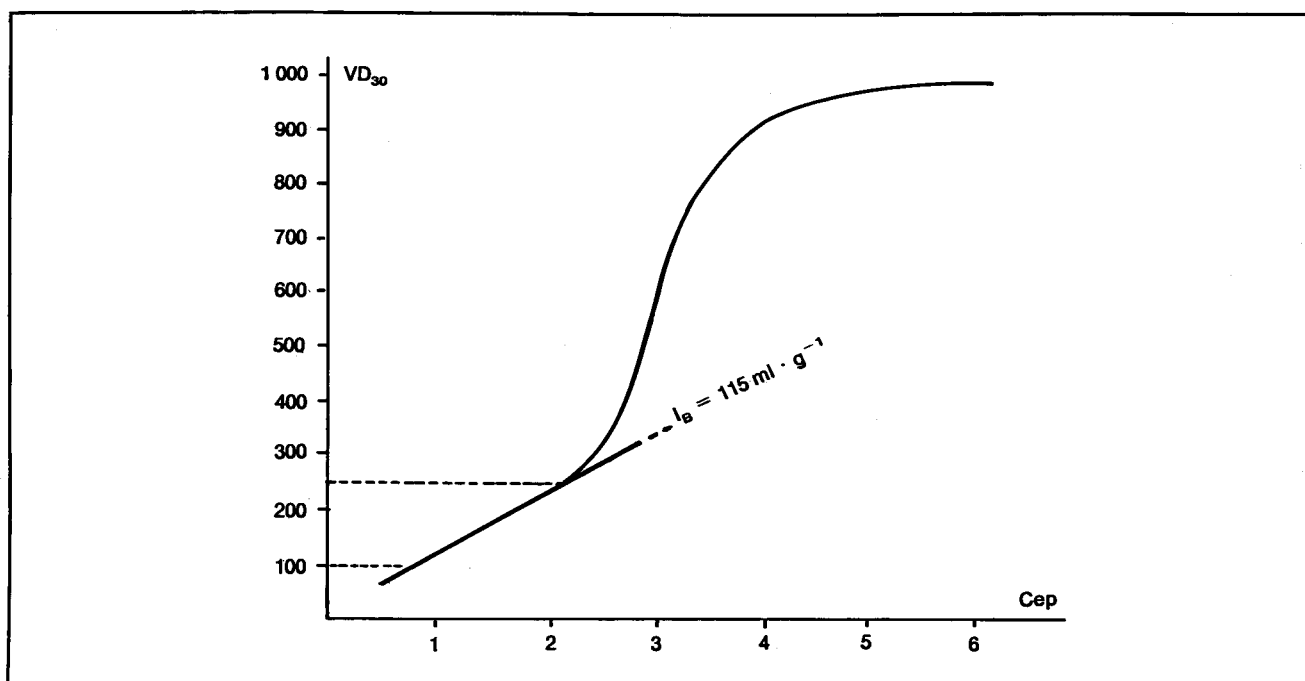


Figure 20 : Variation du volume décanté avec la concentration en MES dans l'éprouvette.

concentration. En effet, le volume décanté dépend de la concentration dans l'éprouvette (fig. 20). Il faut que le volume décanté soit proportionnel à la concentration pour que l'indice soit stable et donc significatif de la décantabilité des boues. Cette condition est obtenue si  $VD_{30}$  est inférieur à 300 ml.

Par ailleurs, il est souhaitable de ne pas travailler avec des volumes décantés inférieurs à 100 ml/l, car l'incertitude sur le résultat de la mesure des MES devient alors excessive. Il en est de même lorsque les dilutions sont supérieures au dixième : c'est par exemple le cas de boues très filamenteuses dont la concentration initiale (non diluée) est inférieure à 3 g/l.

Pour des milieux à forte conductivité (> 1000 à 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), il est recommandé de pratiquer l'analyse des MES par la procédure de filtration lorsque les concentrations à mesurer sont inférieures à 0,5 g de MES par litre.

#### *Description du test de décantation :*

1 - Prélever un échantillon de boue en sortie du bassin d'aération (l'aérateur étant en fonctionnement depuis 1/4 d'heure) et un échantillon d'eau clarifiée (éviter les flottants).

2 - Introduire dans l'éprouvette les deux fractions de façon à obtenir une dilution de la boue telle que  $VD_{30}$  soit inférieur à 300 ml. Dans le cas d'une boue inconnue, plusieurs tests

doivent être réalisés en parallèle afin de pouvoir choisir la dilution qui fournira un volume décanté inférieur ou égal à 300 ml/l, mais supérieur à 100 ml/l.

3 - Ajuster le niveau du liquide à 1000 ml.

4 - Agiter vigoureusement l'éprouvette de bas en haut sans perdre du mélange (obturer avec la paume de la main).

5 - Poser l'éprouvette sur un plan horizontal stable, à l'ombre et déclencher la minuterie ( $t_0$ ).

6 - Au temps  $t_0 + 30$  minutes, noter le niveau du voile de boue (interface boue-eau) dans l'éprouvette. Cette valeur notée  $VD_{30}$  doit impérativement être comprise entre 100 et 300 ml/l.

#### *Résultats*

L'indice de boue sera exprimé en multiple de 10 pour tenir compte des incertitudes inhérentes à la procédure.

Les indices inférieurs à 100 ml/g correspondent à des boues décantant facilement, les indices > 200 ml/g sont à rapprocher de boues filamenteuses à faible décantabilité.

L'indice déterminé dans les conditions décrites ne varie pas sur une station (que la boue soit prélevée dans le bassin d'aération ou au débouché de la recirculation,...).

---

## Détermination des principaux microorganismes filamenteux observés dans les boues activées

### MATÉRIEL

- Microscope binoculaire :
- équipé en contraste de phase,
  - grossissement (500 à 1200 X),
  - échelle micrométrique : réticule gradué.

### MÉTHODE D'OBSERVATION

1° Analyse des caractéristiques physiques des filaments présents dans l'échantillon de boue : établissement d'une fiche type (DOCUMENT : I)

2° Comparaison des résultats de la fiche type aux caractéristiques des filaments (DOCUMENT : II).

3° Identification des microorganismes filamenteux.

### DOCUMENTS DISPONIBLES

Doc 1. une fiche d'observation type.
















Doc 2. Tableau des caractéristiques des principaux microorganismes observés dans les boues activées.

Doc 3. Description des principaux germes filamenteux (illustrations photos)

Doc. 4 Procédures utilisées pour les colorations.



## Fiche d'observation type

ORIGINE ECHANTILLON	DATE ET HEURE		MICROORGANISME FILAMENTEUX (DOMINANT)				REMARQUES	
	PREL.	OBSER.	1	2	3	4		
CARACTERES GENERAUX OBSERVES (CONTRASTE DE PHASE 500 à 1200 x)	FILAMENTS	DIAMETRE	< 1 $\mu$ m					
			1 à 2,5 $\mu$ m					
		LONGUEUR	> 200 $\mu$ m					
		RAMIFICATIONS	fausses 					
			vraies 					
		MOBILITE						
	FORME	rigide 						
		souple 						
		avec boucles 						
		en spirale 						
	GÂINE							
	ADHERENCES	abondantes 						
rares								
CELLULES	CLOISONNEMENT VISIBLE							
	FORME	rectangulaire 						
		ovoïde 						
		discoïde 						
		variable 						
INCLUSIONS (granules)	soufre 							
	autres 							
COLORATION	GRAM	positif (bleu, violette)						
		négatif (rose)						
	NEISSER	positif cellules bleu-gris granules visibles						
		négatif						
	TEST AU SULFITE							
<b>CONCLUSION : IDENTIFICATION DES GERMES OBSERVES</b> 1 - 2 - 3 - 4 -								









## Description et illustration des principaux micro-organismes filamenteux

Ce document décrit les principaux germes filamenteux rencontrés dans les boues activées. La description repose sur l'observation de critères morphologiques et sur quelques colorations simples (Gram, Neisser, test au sulfite).

Pour faciliter la lecture du descriptif, les germes ont été regroupés selon leur appartenance à des domaines caractéristiques du traitement par boues activées (faible ou forte charge massique).

### A. STATIONS À BOUES ACTIVÉES — FAIBLE CHARGE MASSIQUE

#### Légende :

G : Coloration Gram  
N : Coloration Neisser  
S : test au sulfite  
+ : positif  
- : négatif

Les procédures utilisées pour les préparations sont décrites dans le document n° IV.

\* **Haliscomenobacter hydrossis** : (G - ; N - ; S-)

#### Morphologie :

Filament de longueur moyenne (50 à 200  $\mu\text{m}$ ), très raide, fin ( $\varnothing < 0,5 \mu\text{m}$ ), non mobile, gaine présente, absence de ramification. Les cloisonnements dans le filament ne sont pas visibles aux grossissements habituels (1000 à 1200 X) (photo 9).

Attention, ce filament très fin peut échapper à un observateur non averti, aux faibles grossissements (100 à 200X).

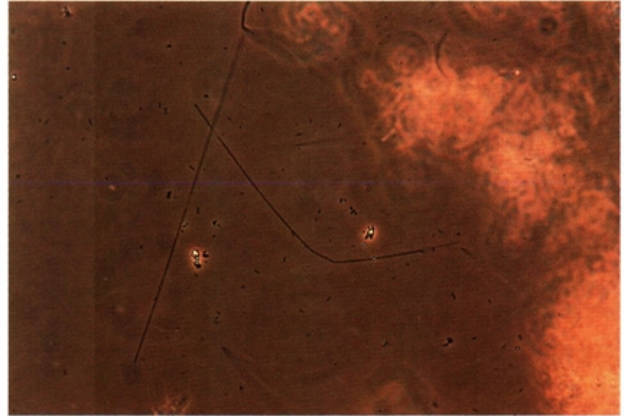


Photo 9 : *Haliscomenobacter hydrossis*. Contraste de phase 500  $\times$ .

#### Relation avec le milieu :

Résistant aux carences en oxygène dissous ou en nutriments. Assez rare dans les boues activées.

\* **Microthrix parvicella** : (G+ ; N+ ; S-)

#### Morphologie :

Filament long (100 à 500  $\mu\text{m}$ ), très souple, sinueux, fin ( $\varnothing 0,6$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ), parfois enchevêtré dans les grains de floc. Absence de ramifications et d'adhérences. Cloisonnements difficiles à voir (photo 10) ; voir aussi photo 8.

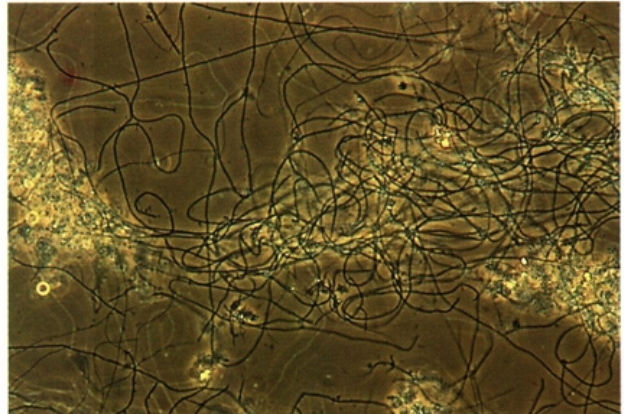


Photo 10 : *Microthrix parvicella*. Contraste de phase 500  $\times$ .

La coloration de NEISSER est plutôt positive (granules sombres de polyphosphates parfois visibles dans le filament même sans coloration).

*Relation avec le milieu :*

Développement accéléré en cas de déficit marqué en oxygène dissous. Fréquent dans les boues activées, souvent mis en relation avec des phénomènes de mousses stables. (PUJOL, 1990).

\* **Type 0581** : ( G - ; N - ; S-)

Morphologiquement proche de Microthrix p.. Les différences portent essentiellement sur les résultats des colorations. Ce filament est généralement moins large et plus fin (0,4 à 0,6 µm) et forme fréquemment des boucles.

\* **Type 0041** : (G+ (si filament nu et près du floc), N- ; S-)

*Morphologie :*

Filament raide ou légèrement courbé, souvent long (jusqu'à 500 µm) comprenant des cellules rectangulaires (1,2 à 1,6 µm X 1,5 à 4 µm) entourées d'une gaine souvent recouverte de particules : phénomènes d'adhérences (photos 11 et 12).

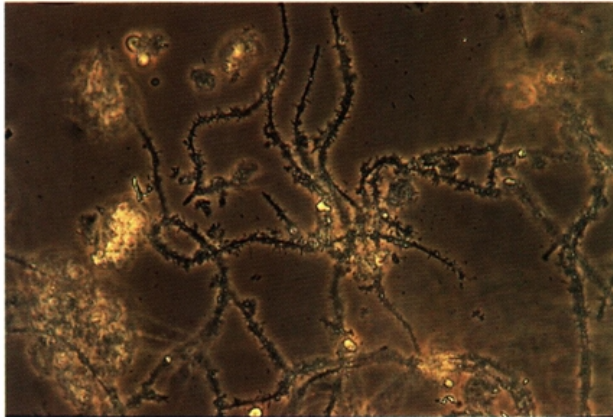


Photo 11 : Type 0041. Contraste de phase 500 ×.



Photo 12 : Type 0041. Contraste de phase 1 250 ×.

*Relation avec le milieu :*

Très fréquent dans le traitement par boues activées en aération prolongée. En milieu sous aéré, des granules intracellulaires sont visibles dans les filaments.

\* **Type 0675** :

Type morphologique proche du type 0041 dont il se différencie par le diamètre (0,5 à 1 µm) et la longueur (50 à 150 µm).

Fréquent dans les boues, parfois en relation avec un phénomène de mousses stables.

\* **Type 1851** : (G+ ; N- ; S-)

*Morphologie :*

Filament proche du type 0041, assez rigide. Les phénomènes d'adhérences sont nettement marqués. Ces particules se présentent le plus souvent sous forme de bâtonnets plus ou moins longs, perpendiculaires au trichome. Les cellules rectangulaires sont difficiles à voir sauf aux extrémités (moins d'adhérences) (photo 13).

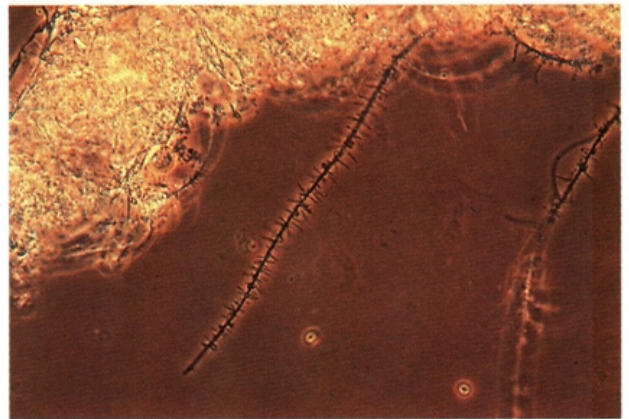


Photo 13 : Type 1851. Contraste de phase 500 ×.

*Relation avec le milieu :*

Fréquent dans les boues activées traitant des eaux résiduaires d'industries agro-alimentaires.

\* **Type 0092** : ( G- ; N+ (filament coloré au bleu gris) ; S-)

*Morphologie :*

Filament de forme variable (plutôt rigide), assez court (100 µm) et fin. Les cellules de forme rectangulaire (0,6 X 1,5 µm) sont difficiles à observer. Il se différencie d'Haliscomenobacter par le résultat du Neisser, par son allure (moins raide) et sa longueur (moins long) (photo 14).

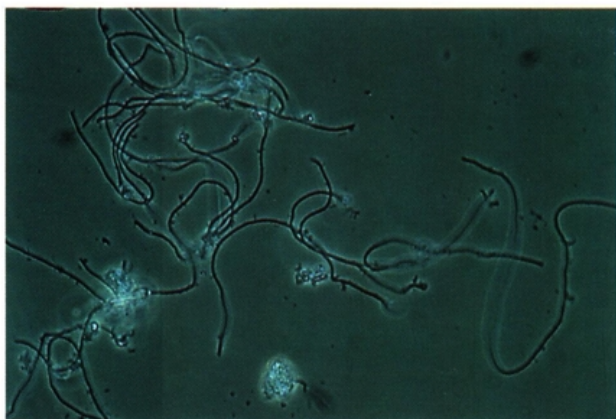


Photo 14: Type 0092. Contraste de phase 1 250 ×.

\* **Type 0961** : ( G- ; N- ; S-)

*Morphologie :*

Filament assez rigide et long (200 à 500µm). Les cellules sont de forme rectangulaire, allongées (0,8 à 1,2 µm X 4 à 8 µm), elles apparaissent souvent translucides à travers la gaine, les cloisonnements sont observés à des forts grossissements en contraste de phase (photo 15).

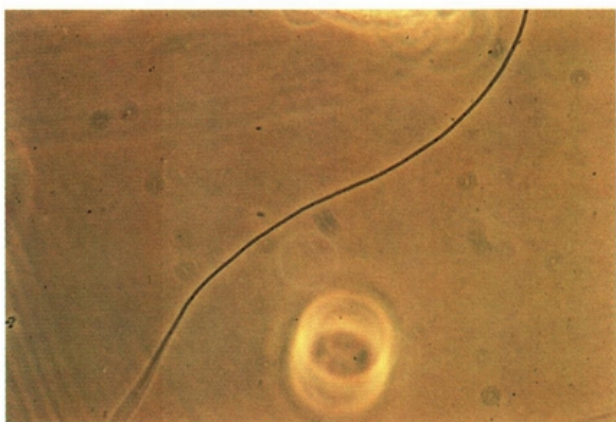


Photo 15: Type 0961. Contraste de phase 500 ×.

*Relation avec le milieu :*

Présence fréquente dans le traitement d'eaux résiduaires industrielles (agro-alimentaires) carencées en azote ammoniacal.

\* **Type 803** : (G±, N±, S-)

*Morphologie :*

Filament rigide (100 à 200 µm de long), cellules rectangulaires ou carrées (∅ de 0,7 à 0,8 µm). Cloisonnement parfois difficile à voir en raison de la présence de nombreux petits granules noirs à l'intérieur des filaments.

*Relation avec le milieu :*

Parfois associé à des phénomènes de mousage, il se présente alors sous forme d'arcs de cercle.

## B. STATIONS À BOUES ACTIVÉES MOYENNE — FORTE CHARGE

\* **Sphaerotilus natans** : (G- ; N- ; S-)

*Morphologie :*

Filament long (jusqu'à 1000 µm), peu souple. Cellules rectangulaires, aux extrémités arrondies (1,5 à 2 µm X 3 à 5) entourées d'une gaine bien nette. Fausse ramifications très caractéristiques. Granulations intracellulaires parfois visibles (PHB) (photo 16) ; voir aussi photo 26.

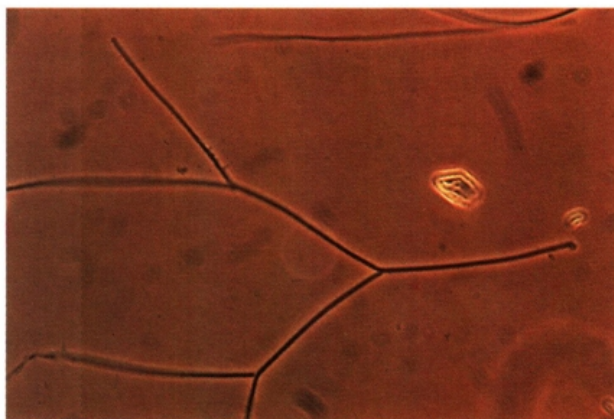


Photo 16: Sphaerotilus natans. Contraste de phase 500 ×.

*Relation avec le milieu :*

Favorisé par les carences en azote ou phosphore, ainsi que par un déficit en oxygène.

Souvent considéré comme responsable majeur du foisonnement alors qu'en réalité il est rarement observé dans les boues activées classiques. Il est en revanche fréquent dans les systèmes à cultures fixées ou dans les stations recevant des effluents riches en glucides et fonctionnant à des charges massiques plutôt élevées.

\* **Type 1701** : (G- ; N- ; S-)

Forme proche de Sphaerotilus, mais filament généralement moins long (100 à 200 µm), ne présentant pas de faux embranchements (ou ramifications). Fréquemment observé (photo 17).

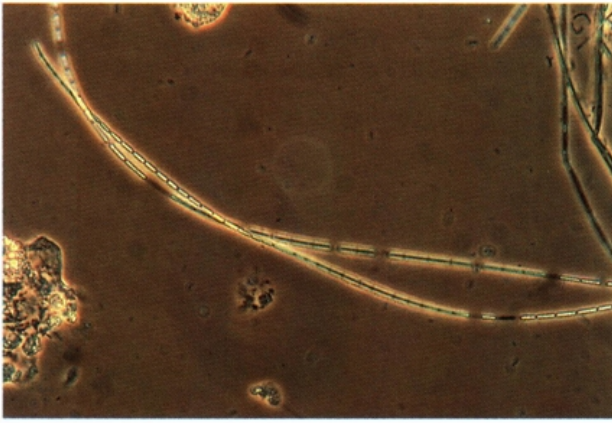


Photo 17 : Type 1701. Contraste de phase 1 250 ×.

\* **Type 1863 :** (G- ; N- ; S-)

*Morphologie :*

Filament court (< 100 µm) constitué de cellules ovales (0,8 X 1,5 µm) formant des chaînettes irrégulièrement courbées, toujours libres dans le liquide interstitiel. Ce type est l'un des rares à ne pas être gainé (photo 18).

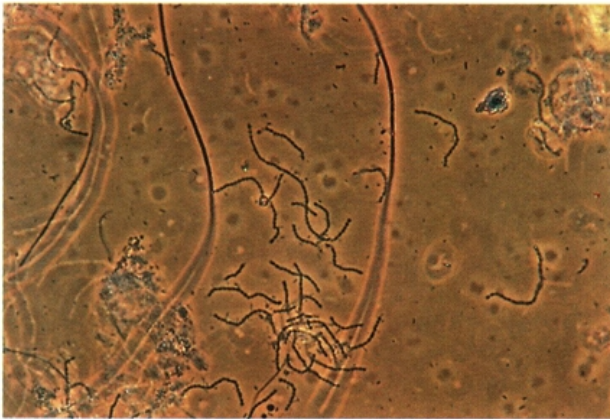


Photo 18 : Type 1863. Contraste de phase 500 ×.

*relation avec le milieu :*

Fréquent en cas de surcharge organique sur les stations, son développement est fortement freiné lorsque la charge diminue.

**C. PRÉSENCE DE COMPOSÉS SOUFRÉS RÉDUITS DANS LE MILIEU**

\* **Thiiothrix sp. :** (G- ; N- ; S±)

*Morphologie :*

Filament droit ou légèrement courbe, de longueur variable pouvant atteindre 500 µm, forme parfois des rosettes (filament partant du floc dans toutes les directions). Cellules rectan-

gulaires bien visibles dans les trichomes ( $\varnothing > 1$  à 3 µm). Des granulations réfringentes de soufre sont parfois directement observées ou mises en évidence après application du test au sulfite.

Habituellement notée *Thiiothrix II*, une forme proche de *Sphaerotilus* a été décrite par EIKELBOOM : elle ne se différencie de *Sphaerotilus* que par la présence des granules de soufre (photos 19 et 20).



Photo 19 : Thiiothrix II. Lumière naturelle 125 ×.

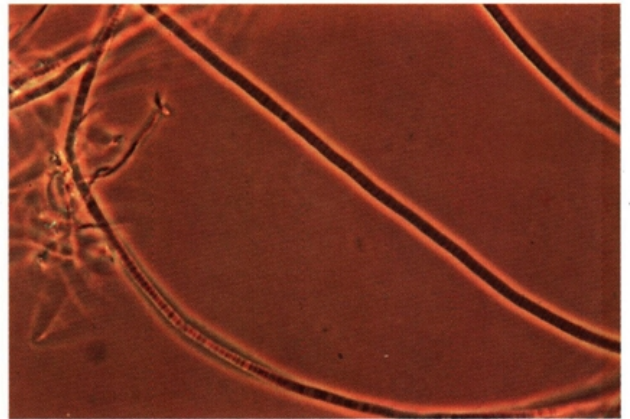


Photo 20 : Thiiothrix I. Contraste de phase 500 ×.

*Relation avec le milieu :*

Ces germes se développent dans les stations alimentées par des effluents septiques, riches en composés soufrés réduits ou en cas de sous-aération des boues.

\* **Beggiatoa sp. :** (G- ; N- ; S+)

*Morphologie :*

Filament flexible, (longueur 100 à 300 µm ; largeur 1 à 3 µm) lentement mobile au sein du liquide interstitiel. Cloisonnements internes difficiles à observer, cachés par les nombreux granules de soufre très réfringents présents dans les trichomes.

#### Relation avec le milieu :

Observé fréquemment quand la boue activée est précédée d'un lit bactérien forte charge, ainsi que sur les cultures fixées surchargées, mal aérées.

#### \* Type 0914 : (G- ; N+ ; S+)

Filament rigide de 50 à 100  $\mu\text{m}$  de long, 0,7 à 1  $\mu\text{m}$  de large, souvent libre au sein du liquide. Cellules de forme carrée à rectangulaire, visibles à fort grossissement. Granulations de soufre plutôt carrées, alors que dans les types précédents les granules ont une forme arrondie. Le test S est paradoxalement négatif.

### D. FILAMENTS DIVERS

#### \* Type 021 N : (G- ; N $\pm$ ; S $\pm$ )

#### Morphologie :

Filament long, (500 à 1000  $\mu\text{m}$ ) rigide, large ( $\varnothing$  1  $\mu$  à 3  $\mu$ ). Cellules de forme irrégulières le plus souvent carrées ou discoïdes. Présence de fines granulations sombres (PHB) à l'intérieur des cellules, parfois mise en évidence de granules de soufre par le test S. Filament considéré par certains auteurs comme appartenant au genre *Thiothrix* (photo 21).



Photo 21 : Type 021N (+ *Nostocoïda limicola*). Contraste de phase 500  $\times$ .

#### Relation avec le milieu :

Germes souvent associés à des effluents déséquilibrés en nutriments, croissance favorisée par les déficits en oxygène.

#### \* Type *Nostocoïda limicola* sp. : (G+ ; N+ ; S-)

#### Morphologie :

Filament plus ou moins rigide, de longueur variant entre 100 et 300  $\mu\text{m}$  ; libre dans l'espace

interflocs (largeur 0,6 à 1,5  $\mu\text{m}$ ). Cellules de forme irrégulière, le plus souvent ovales présentant des phénomènes de « boursoufflures ». Fines granulations sombres (PHB) visibles (photo 22), voir aussi photo 21.

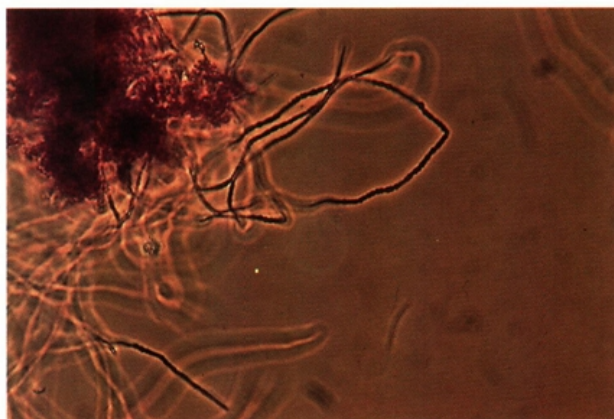


Photo 22 : *Nostocoïda limicola*. Contraste de phase 500  $\times$ .

Plusieurs types ont été décrits, différenciés principalement par leur taille. Ici ils ont été regroupés en absence de connaissances suffisantes sur leur signification écologique.

#### Relation avec le milieu :

Présence d'effluents industriels facilement assimilables.

#### \* *Nocardia* sp. : (G+ ; N $\pm$ ; S-)

#### Morphologie :

Filament court ramifié (50  $\mu\text{m}$  maximum entre deux ramifications) baignant dans le liquide interflocs. Cellules de formes irrégulières ( $\varnothing$  1 à 1,5  $\mu\text{m}$ ), cloisonnement difficile à voir au faible grossissement (photo 23) ; voir aussi photo 3.



Photo 23 : *Nocardia* sp. Contraste de phase 500  $\times$ .

*Relation avec le milieu :*

Ce « filament » est un champignon actinomycète, conduisant à des formations de mousses stables en surface des bassins d'aération et de décantation. En général, peu d'incidence sur la décantabilité des boues.

\* **Champignons divers :**

*Morphologie :*

Trichome de taille variable mais large ( $\varnothing$  2 à 6  $\mu\text{m}$ ) souvent long, ramifié ou non. Cellules irrégulières, parfois rectangulaires, « bourgeonnements » apicaux visibles (photo 24).

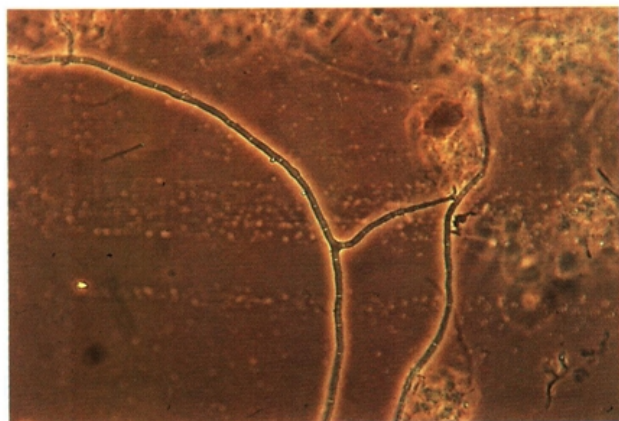


Photo 24 : Champignons. Contraste de phase 500  $\times$ .

*Relation avec le milieu :*

Les champignons peuvent être très diversifiés, ils sont à mettre en relation avec la présence d'eaux résiduaires industrielles (effluents acides,...). Si leur développement est très important (cas rare), ils sont susceptibles d'altérer la décantabilité des boues.

\* **Saprospires (Spirilles) :**

Filament très fin, à ondulations rapides, libre au sein du liquide inter-floc. Ils n'affectent en principe pas la décantation des boues sauf si leur densité devient anormalement forte (rare et transitoire) (photo 25).

— Leur apparition est souvent à rapprocher d'apports d'eaux septiques (fosses, retour de silos), conjuguée à une sous aération des boues.

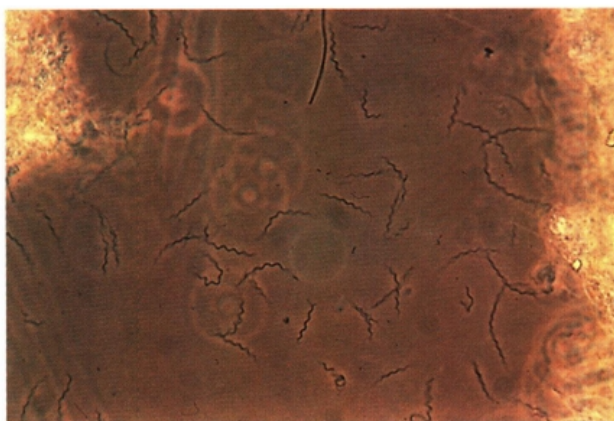


Photo 25 : Spirilles. Contraste de phase 500  $\times$ .



## Procédures utilisées pour les colorations

### COLORATION GRAM D'après JENKINS et coll., 1986

#### 1. PRÉPARATION DES SOLUTIONS

Solution 1 :

	A
Violet cristal	2 g
Ethanol à 95 %	20 ml
	B
Oxalate d'ammonium	0,8 g
Eau distillée	80 ml
Mélange A + B = solution (1)	

Solution 2 :

Iode	1 g
Iodure de potassium	2 g
Eau distillée	300 ml

Solution 3 :

Safranine 0 (2,5 % dans éthanol à 95%)	10 ml
Eau distillée	100 ml

*Remarque :* Les solutions sont commercialisées prêtes à l'emploi (sous forme de kit).

#### 2. PROCÉDURE

- Fixer la préparation sur la lame (laisser sécher sans chauffer).
- Appliquer la solution (1) pendant une minute. Rincer à l'eau.
- Appliquer la solution (2). Rincer à l'eau.
- Incliner la lame et décolorer partiellement par de l'éthanol à 95% versé goutte à goutte sur la préparation pendant 25 secondes environ.

- Appliquer la solution (3) pendant une minute. Rincer à l'eau et laisser sécher à l'air.
- Observer à un grossissement > 500 X

#### 3. RÉSULTATS

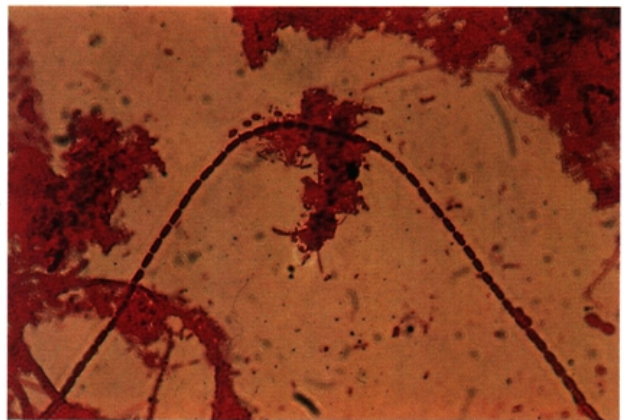


Photo 26 : Gram  $\ominus$  *Sphaerotilus natans*.  
Contraste de phase 1 250  $\times$ .

- Les filaments colorés en bleu violet sont considérés comme GRAM positif  $\oplus$ .
- Les filaments colorés en rose sont GRAM négatif  $\ominus$  (photo 26).

### COLORATION NEISSER (pratiquée au CEMAGREF)

#### 1. PRÉPARATION DES SOLUTIONS

Solution Bleu acétique :

Bleu de méthylène	1 g
Alcool absolu	20 ml
Acide acétique glacial	50 ml
Eau distillée	950 ml

Solution de Vésuvine :

Vésuvine au Brun de Bismark 2 g  
Eau distillée bouillante 1 000 ml

## 2. PROCÉDURE

- Fixer la préparation sur la lame (laisser sécher).
- Appliquer la solution de bleu acétique pendant 10 minutes.
- Rincer à l'eau.
- Recouvrir pendant 1 minute de vésuvine.
- Rincer à l'eau.
- Observer au microscope en contraste de phase (grossissement > 500 X).

## 3. RÉSULTATS



Photo 27 : *Neisser* ⊕ *Microthrix* sp. Contraste de phase 1 250 ×.

- Les filaments colorés en bleu violet, ou les granules bleu foncé visibles dans le filament, sont considérés comme NEISSER positif ⊕ (photo 27).
- La coloration jaune-brun est associée à un résultat NEISSER négatif ⊖.

## TEST 5 MISE EN ÉVIDENCE DES GRANULES DE SOUFRE

- Préparer une solution mère de sulfite de sodium à 2 g/l.
- Mélanger 1 volume de la solution mère avec le même volume de l'échantillon à observer.
- Laisser en contact 10 à 20 minutes.
- Prélever une goutte du mélange. Placer entre lame et lamelle.
- Observer au microscope.

Résultat positif :

- Les granules de soufre apparaissent très réfringents, et, en principe de forme sphérique.

## MISE EN ÉVIDENCE DE LA GAINÉ

- Utiliser un indicateur coloré (bleu de méthylène ou violet de cristal).
- Mélanger une goutte d'indicateur avec une goutte d'échantillon.
- Observer.

Résultat :

Les cellules sont colorées en bleu, leurs limites sont plus nettes (grossissement > 500 X). Des zones plus claires, transparentes délimitent le fourreau entourant les cellules, on parle alors de gainé.

En observation naturelle (sans coloration), ces zones claires peuvent directement être mises en évidence. Il s'agit alors d'une zone de fragilité pour le filament (elles correspondent alors à des cellules mortes dans le trichome). Les ruptures de filament interviennent à ce niveau. Ce fait est important à souligner, notamment pour le suivi de l'efficacité d'un ajout de réactif toxique pour lutter contre le foisonnement (voir Fiche technique n° 2).

# Références bibliographiques

- Brevet SAPS n° 8816612 — Procédé et installation perfectionnés pour détruire le foisonnement filamenteux. Inventeurs : G. BESSON, A. COLLIGNON, G. MARTIN.
- CHAMBERS (B.) et TOMLINSON (E.J.) ed (1982). - *Bulking of activated sludge: Presentative and remedial methods*, Chichester: Ellis Horwood Publishers, 279 p.
- CHAMBERS (B.) et TOMLINSON (E.J.) (1982). - The cost of chemical treatment to control the bulking of activated sludge. In : *Bulking of activated sludge: Presentative and remedial methods*, Chichester: Ellis Horwood Publishers, CHAMBERS (B.) et TOMLINSON (E.J.) ed (1982), p. 264-271.
- CHUDOBA (J.), GRAU (P.) et OTTAWA (V.) (1973.II). - Control of activated sludge bulking: II: Selection of micro-organisms by mean of a selector, *Water Res.*, v. 7, p. 1389-1406.
- CHUDOBA (J.), DOHANYOS (M.) et GRAU (P.) (1982). - Control of activated sludge bulking: IV: Effect of sludge regeneration, *Water Sci. Techn.*, v. 14, p. 73-93.
- CHUDOBA (J.) (1985). - Control of activated sludge bulking: VI: formulation of basic principles, *Water Res.*, v. 19, n° 8, p. 1017-1022.
- COLLIGNON (A.) (1988). - Le foisonnement filamenteux: étude de deux techniques physico-chimiques curatives. Thèse: Université de Rennes I, 142 p.
- CTGREF (1979). - Etude expérimentale des décanteurs secondaires - CTGREF (Paris) - Etude n° 45, 80 p.
- EIKELBOOM (D.H.) et VAN BUIJSEN (H.J.J.) (1983). - Microscopic sludge investigation manual. Delft: TNO, second edition, 81 p.
- FORTIN (M.N.) (1986). - Recherche sur les conditions de formation et de réduction du foisonnement filamenteux dans les boues activées. Thèse: Université de Rennes I, 243 p.
- JENKINS (D.), RICHARD (M.J.) et DAIGGER (G.T.) (1986). - Manual of the causes and control of activated sludge bulking and foaming. Ridgeline Press Lafayette. CA 94 549 - U.S.A., 165 p.
- MORFAUX (J.N.) et ALBAGNAC (G.) (1979). - Ecophysiologie des boues activées induites dans les stations d'épuration industrielles ou mixtes par les effluents à forte charge glucidique, *J. Français d'Hydrologie*, v. 10, n° 28, p. 37-46.
- OLIVET (R.), MORFAUX (J.N.), ALBAGNAC (G.) et TOUZEL (J.P.) (1981). - Calcul et optimisation du contact stabilisation, *Tribune du Cebedeau*, v. 34, n° 447, p. 67-75.
- PALM (J.C.) et JENKINS (D.) (1980). - Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely mixed activated sludge process, *J. Water Pollut. Control Fed.*, v. 52, N° 10, p. 2484-2506.
- PUJOL R. (1987). - Maîtrise du foisonnement des boues activées: Biosorption et zones de contact. Approche méthodologique. Thèse de Doctorat: INSA Lyon, 154 p.
- PUJOL (R.) et CANLER (J.P.) (1989). - Le foisonnement des boues activées: situation du problème en France, *Techniques Sciences et Méthodes*, 89, 1, p. 19-24.
- PUJOL (R.) et CANLER (J.P.) (1990). - La technique de la zone de contact, *Informations Techniques du CEMAGREF*, mars 1990, n° 77, note 6.
- PUJOL (R.) (1990). - Les mousses biologiques stables dans les stations d'épuration, 9 p., *Journées informations eaux*, Poitiers, sept. 1990.
- STROM (P.F.) et JENKINS (D.) (1984). - Identification and significance of filamentous microorganisms in activated sludge, *J. Water Pollut. Control*, v. 56, n° 5, p. 449-459.

## LISTE DES DOCUMENTS TECHNIQUES F.N.D.A.E.

n° 1 – L'exploitation des lagunages naturels	1985	disponible
n° 2 – Définition des caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi des appareils de désinfection	1986	en réimpression
n° 3 – Manuel pratique pour le renforcement de l'étanchéité des réservoirs d'eau potable	1986	disponible
n° 4 – Plan de secours pour l'alimentation en eau potable	1986	disponible
n° 5 – Les stations d'épuration adaptées aux petites collectivités	1986	disponible
n° 6 – Les bassins d'orage sur les réseaux d'assainissement	1988	disponible
n° 7 – Le Génie Civil des Bassins de lagunage naturel	1990	disponible
n° 8 – Guide technique sur le foisonnement des boues activées	1990	disponible
n° 9 – Les systèmes de traitement des boues des petites collectivités	1990	disponible
n° 10 – Élimination de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités	1990	disponible

### DOCUMENTS HORS-SÉRIE

– La gestion des Services d'eau potable Guide à l'usage des maires des communes rurales	1987	disponible
– Situation de l'alimentation en eau potable des communes rurales en 1985	1987	disponible

L'ensemble de ces documents est disponible au Ministère de l'Agriculture et de la Forêt – Bureau des Infrastructures Rurales – 19 Avenue du Maine, 75032 Paris Cedex 15 – Tél : (1) 49.55.54.83.

Par ailleurs, les documents portant les numéros 7 – 8 – 9 – 10 peuvent être commandés au CEMAGREF – DICOVA – BP 22, 92162 Antony Cedex – Tél : (1) 40.96.61.32.

---

**Prix de vente unitaire : 85 F TTC Franco**

# Les "ÉTUDES" du CEMAGREF

## Série : Ressources en eau

- N° 1 Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique  
1990, 17 x 24, broché - 164 pages, 72 illustrations noir et blanc - Prix : 200 F
- N° 2 Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle  
1990, 17 x 24, broché - 228 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 250 F

## Série : Hydraulique agricole

- N° 1 Etude de la qualité des eaux de drainage . Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale . La tranchée de drainage . Une nouvelle expression de la hauteur équivalente . A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée  
1986, 21 x 29,7 - 182 pages - Prix : 200 F
- N° 2 Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains  
1987, 21 x 29,7 - 220 pages - Prix : 200 F
- N° 3 Secteurs de références drainage. Recueil des expérimentations  
1988, classeur 20 x 26 - 92 fiches, 106 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 4 Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA  
1989, 17 x 24, broché - 334 pages, 98 illustrations noir et blanc - Prix : 250 F
- N° 5 Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement  
1989, 17 x 24, broché - 322 pages, 117 illustrations noir et blanc - Prix : 250 F
- N° 6 Réseaux collectifs d'irrigation ramifiée sous pression. Calcul et fonctionnement  
1989, 17 x 24, broché - 1989, 17 x 24, broché - Prix : 150 F
- N° 7 Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions  
1990, 17 x 24, broché - 144 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 200 F

## Série : Equipement des IAA

- N° 1 Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement  
1990, 17 x 24, broché - 56 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 100 F

## Série : Forêt

- N° 1 Annales 1988  
1989, 17 x 24, broché - 126 pages, 30 dessins et photos noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 2 Le Massif Central Cristallin Analyse du milieu - Choix des essences  
1989, 17 x 24, broché - 104 pages, 14 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 3 Les stations forestières du pays d'Othe  
1990, 17 x 24, broché - 174 pages, 45 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F

