

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.

2.3. Les difficultés liées à la faible compacité des boues

1^{er} 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).

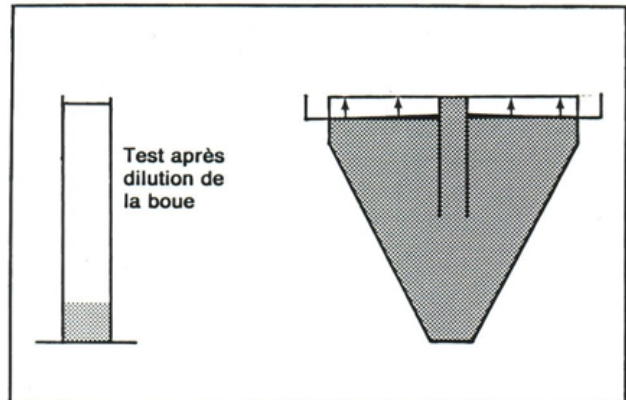


Figure 10 : Comportement de la boue en décantation.

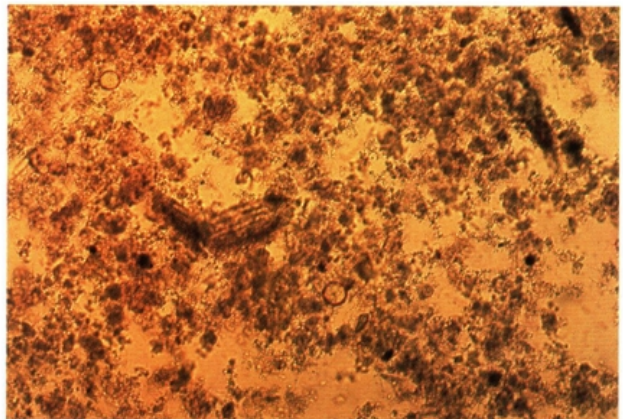


Photo 4 : Structure microscopique de la boue (1 Nat. 125 ×).

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^e 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).

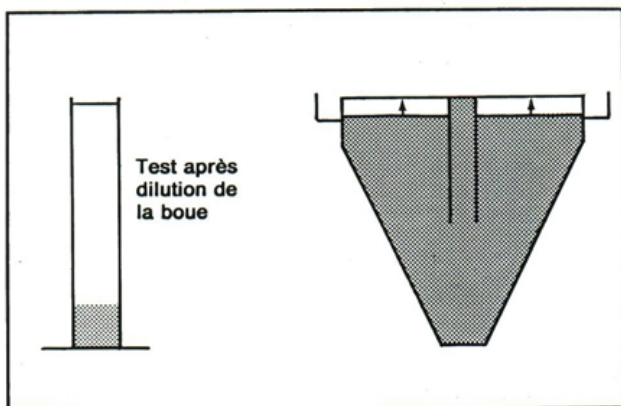


Figure 11 : Comportement de la boue en décantation.

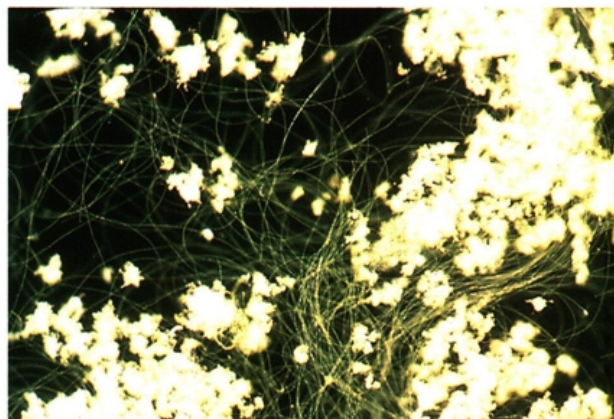


Photo 5 : Structure microscopique de la boue (fond noir 125 ×).

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 $\mu\text{m/ml}$).

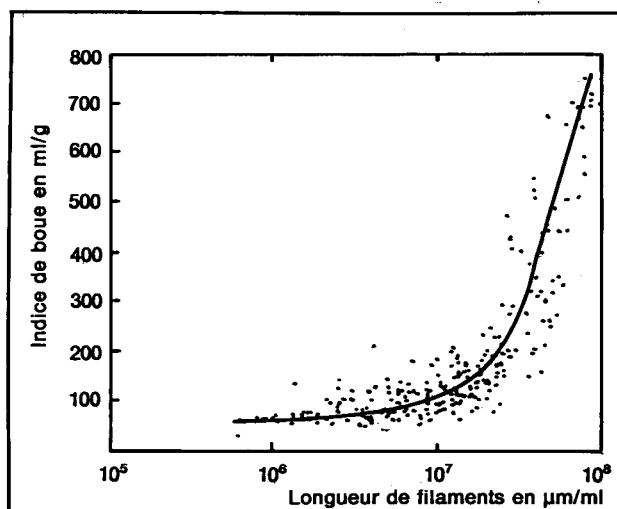


Figure 12 : Relation indice de boue et longueur totale des filaments (d'après PALM et coll., 1980).

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 ×).

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)

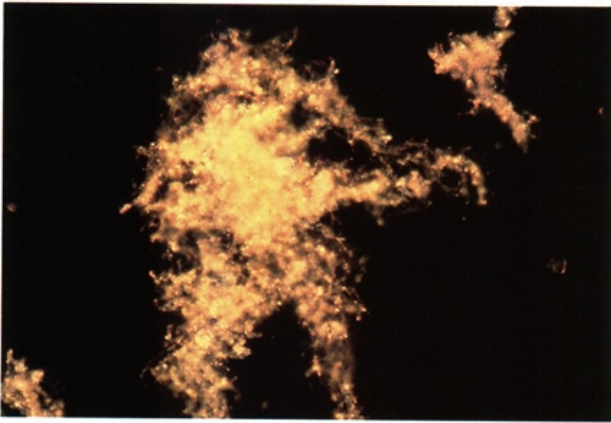


Photo 7 : Structure microscopique de la boue (fond noir 125 ×).

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)

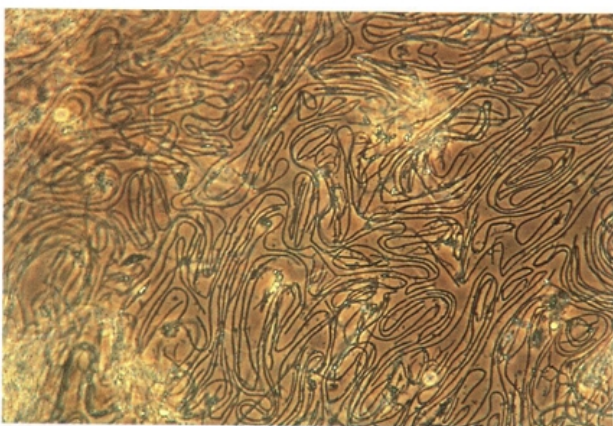


Photo 8 : Structure microscopique de la boue (contraste de phase 500 ×).

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.

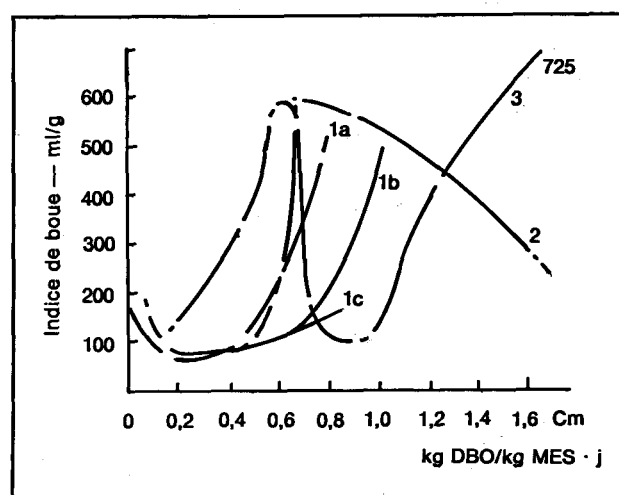


Figure 13: Relations Indice de boue-Charge massique d'après CHUDOBA (1985).

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.

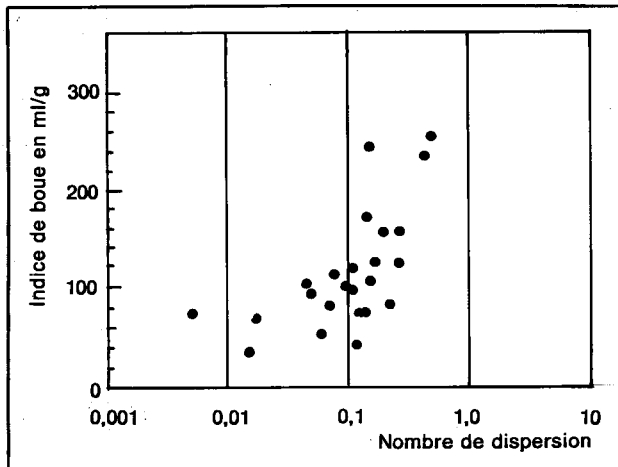


Figure 14 : Relation indice de boue et nombre de dispersion d'après CHAMBERS et TOMLINSON (1982).

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).

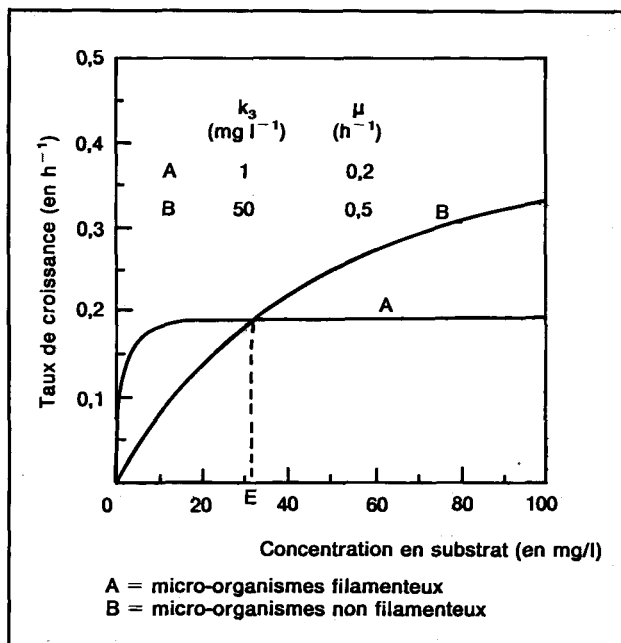


Figure 15 : Différenciation des taux de croissance d'après CHUDOBA et coll., 1973 II).

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.