

# THESE

Présentée devant



n° 12324.

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

Pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

SPECIALITE : GESTION ET TRAITEMENT DES DECHETS

Par

**Roger PUJOL**

Maître ès Sciences

---

MAITRISE DU FOISONNEMENT DES BOUES ACTIVEES :  
-BIOSORPTION ET ZONES DE CONTACT  
-APPROCHE METHODOLOGIQUE

---

SOUTENUE LE 10 Juillet 1987

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

JURY :

MM. G. LEYNAUD

G. MARTIN

A. NAVARRO

R. THOMAZEAU

J. VERON

## S O M M A I R E

---

	<u>Page</u>
LEXIQUE des ABREVIATIONS	10
INTRODUCTION	11
<b><u>CHAPITRE I - LE FOISONNEMENT DES BOUES ACTIVEES : CARACTERISATION ET IMPORTANCE.</u></b>	<b>14</b>
<b>1 - LES DIFFICULTES DE DECANTATION LIEES AU PROCEDE D'EPURATION PAR BOUES ACTIVEES.</b>	<b>15</b>
1.1 - Principe du traitement des eaux réiduidaires par le procédé des boues activées.	15
1.2 - Rappel sur la décantation des boues activées.	17
1.21 - L'indice de boue.	18
1.3 - Les problèmes de décantation : approche préliminaire.	19
1.31 - Difficultés de floculation.	19
1.32 - Difficultés liées à la densité.	20
1.33 - Faible compaction de la boue.	20
1.4 - Incidence de la qualité de la boue sur la charge hydraulique du décanteur secondaire.	22
<b>2 - CARACTERISATION DU FOISONNEMENT.</b>	<b>23</b>
2.1 - Les deux types de foisonnement.	23
2.2 - Mise en évidence du foisonnement filamenteux.	24
2.3 - Identification des micro-organismes filamenteux.	26
2.31 - L'observation microscopique : une nécessité.	26
2.32 - Analyse des principaux travaux sur l'élaboration d'une clé de détermination.	27
2.33 - Les principaux micro-organismes filamenteux.	29
2.34 - Relation micro-organismes et milieu.	30
2.4 - Fréquence des cas observés.	31
<b><u>CHAPITRE II - LES MECANISMES DU FOISONNEMENT ET LES MOYENS D'ACTION POUR CONTROLER LA CROISSANCE FILAMENTEUSE.</u></b>	<b>33</b>
PREAMBULE.	34

<b>1 - INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU MILIEU SUR LE FOISSONNEMENT.</b>	<b>35</b>
1.1 - Température et lumière.	35
1.2 - La composition des eaux résiduaires.	35
1.21 - Richesse en hydrates de carbone.	35
1.22 - Carences en nutriments.	36
1.23 - Présence de composés soufrés réducteurs.	37
1.24 - Carences en oligo-éléments.	38
1.25 - Rôle des matières en suspension.	38
1.3 - La charge massique.	39
1.4 - Concentration en oxygène dissous dans les boues.	42
1.5 - Le mode d'écoulement des effluents dans le bassin d'aération.	42
1.6 - Concentration en substrat au voisinage du floc : importance d'un gradient.	44
<b>2 - LES MECANISMES EXPLICATIFS.</b>	<b>46</b>
2.1 - Morphologie des germes filamenteux.	46
2.2 - Aspects particuliers du métabolisme carboné.	47
2.3 - Vitesse de capture du substrat, temps de régénération de la boue.	47
2.4 - Taux de croissance et dynamique des populations.	48
2.41 - Rappel sur les taux de croissance.	48
2.42 - Modèle de CHUDOBA et coll. (1973 II).	49
2.43 - Oxygène dissous et taux de croissance.	50
2.44 - Modèle de CHIESA et IRVINE (1985).	51
<b>3 - LES PRINCIPAUX MOYENS D'ACTION POUR CONTROLER LE FOISSONNEMENT.</b>	<b>54</b>
3.1 - Les techniques à gradient de charge.	54
3.11 - La zone de contact.	54
3.12 - Les systèmes compartimentés.	55
3.2 - Le procédé contact stabilisation.	55
3.3 - Filières de traitement à double étage.	56
3.4 - Optimisation des conditions d'aération.	56
3.5 - Complémentation en nutriments (N ou P).	57
3.6 - Les techniques chimiques.	57
3.7 - Procédés divers.	59
<b>4 - CONCLUSION.</b>	<b>60</b>

<b>CHAPITRE III - RELATIONS NUTRITIONNELLES DANS LES BOUES ACTIVEES :</b> <b><u>BIOSORPTION DES BOUES ACTIVEES.</u></b>	<b>61</b>
<b>1 - LA BIOSORPTION DES BOUES ACTIVEES.</b>	<b>62</b>
1.1 - Mesure de la biosorption : protocole expérimental.	62
1.11 - Principe.	62
1.12 - Matériel et mesures.	64
1.13 - Durée de l'essai.	65
1.14 - Analyse de la matière organique dissoute.	65
1.15 - Analyse des matières en suspension (MES).	65
1.16 - Comparaison avec le protocole d'EIKELBOOM (1982).	66
1.17 - Calcul.	66
1.18 - Reproductibilité de la mesure.	67
1.2 - Notion de charge au niveau du floc (c).	68
1.3 - Relation biosorption (b)-charge (c).	69
1.31 - Modélisation des résultats.	71
<b>2 - CONDITIONS EXPERIMENTALES.</b>	<b>72</b>
2.1 - Mise en oeuvre pratique.	72
2.2 - Caractéristiques générales des stations étudiées.	72
2.3 - Paramètres analysés.	74
<b>3 - ANALYSE DES DONNEES.</b>	<b>74</b>
3.1 - Caractéristiques de l'échantillon : tableau des données.	74
3.2 - Méthodes d'exploitation des données.	77
3.3 - Analyse en composantes principales normée.	77
3.4 - Régression multiple.	79
3.41 - Résultats de l'analyse	79
3.42 - Discussion	81
3.5 - Relation indice de boue-biosorption à l'échelle de la station d'épuration.	81
<b>4 - ETUDE DES VARIATIONS SPECIFIQUES.</b>	<b>83</b>
4.1 - Incidence de la concentration en oxygène dissous.	83
4.11 - Aération du mélange.	83
4.12 - Etat d'aération de la boue.	84
4.2 - Effet du temps de contact.	86
4.3 - Influence de la température.	87
4.4 - Composition des eaux résiduaires.	90

4.5 - Incidence du pH.	92
4.6 - Biosorption et type de filaments.	94
<b>5 - CONCLUSION.</b>	<b>95</b>
<b><u>CHAPITRE IV - MAITRISE DU FOISONNEMENT : EXPERIMENTATIONS DE ZONES DE CONTACT - APPROCHE METHODOLOGIQUE.</u></b>	<b>97</b>
<b>1 - EXPERIMENTATIONS DE ZONES DE CONTACT.</b>	<b>98</b>
1.1 - La zone de contact : rappel bibliographique.	98
1.2 - Les premières expérimentations.	101
1.21 - Essais sur pilotes.	101
1.22 - Essais sur sites réels.	102
1.3 - Cas de la station d'épuration de Vence (06).	103
1.31 - Etudes préalables.	103
1.311 - Données générales.	103
1.312 - Caractéristiques des eaux à traiter.	104
1.313 - Caractéristiques des eaux traitées.	105
1.314 - Observations sur le fonctionnement.	106
1.315 - Caractéristiques des boues.	106
1.316 - Mesures de biosorption.	107
1.317 - Conclusion.	110
1.32 - Mise en oeuvre de la zone de contact et suivi.	110
1.321 - Mise en oeuvre.	110
1.322 - Suivi : contrôle du foisonnement.	112
1.3221 - Conditions de charge.	112
1.3222 - Suivi microbiologique.	112
1.3223 - Suivi de la décantation des boues.	112
1.323 - Discussion.	114
1.4 - Conclusion.	115
<b>2 - CONTROLE DU FOISONNEMENT : APPROCHE METHODOLOGIQUE.</b>	<b>116</b>
2.1 - Objectif.	116
2.2 - Mise en évidence du problème.	117
2.3 - Caractérisation du foisonnement.	118
2.4 - Recherche des origines du foisonnement.	119
2.5 - Choix des solutions à mettre en oeuvre.	119

<b>CONCLUSION GENERALE.</b>	<b>122</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</b>	<b>126</b>
<b>ANNEXES :</b>	<b>132</b>
1 - Références analytiques des paramètres étudiés.	<b>133</b>
2 - Détermination des principaux micro-organismes filamenteux dans les boues activées.	<b>135</b>
3 - Les mécanismes du métabolisme des substances de réserves.	<b>138</b>
4 - Résultats de l'analyse des courbes de biosorption.	<b>141</b>
5 - Analyse des données en composantes principales normée.	<b>142</b>
6 - Schéma de fonctionnement des pilotes.	<b>144</b>
7 - Résultats de la première expérimentation pilote.	<b>145</b>
8 - Résultats des deux premières expérimentations de zones de contact sur le terrain.	<b>146</b>
9 - Conditions d'alimentation de la station.	<b>152</b>
10 - Circulaire du 4 Novembre 1980 (extrait).	<b>153</b>
<b>RESUME.</b>	<b>154</b>

## INTRODUCTION.

Le traitement biologique des eaux résiduaires par le procédé des boues activées est largement répandu. En France, cette technique a connu un essor considérable au cours des dernières décennies, à cause principalement de sa facilité de mise en oeuvre et d'adaptation.

Cependant, on constate bien souvent que les performances et la fiabilité ne sont pas conformes aux objectifs préalablement fixés, ce qui diminue d'autant la rentabilité de l'effort consenti par la collectivité pour protéger son environnement.

Les rapports de contrôle des stations d'épuration montrent que de nombreuses installations en apparence sous chargées, ne traitent pas la totalité des eaux collectées par le réseau d'assainissement. La mauvaise décantation des boues oblige en effet à limiter les débits admis sur la station si l'on veut éviter les rejets de boue dans le milieu récepteur. Le développement des micro-organismes filamenteux dans les boues est souvent invoqué, la prolifération de ces germes affectant négativement les vitesses de décantation des boues.

Divers recensements réalisés à l'étranger montrent qu'environ 40 % des stations d'épuration à boues activées sont plus ou moins atteintes par ce problème biologique désigné par le terme de foisonnement (bulking chez les anglo-saxons).

Confrontés à ce problème majeur et complexe, nous nous sommes fixés pour objectif de clarifier et d'approfondir les connaissances sur le foisonnement tout en recherchant des solutions opérationnelles compatibles avec les exigences technico-économiques du traitement des eaux résiduaires.

Pour conduire cette recherche, nous avons entrepris dans un premier temps des expérimentations sur modèles réduits de stations d'épuration. Ces pilotes offraient l'avantage de pouvoir moduler facilement certains paramètres du fonctionnement mais en revanche, leur alimentation directe par des effluents bruts était particulièrement contraignante.

Les résultats obtenus s'étant avérés peu probants, nous avons été amenés à envisager une alimentation par effluent synthétique à laquelle nous avons préféré renoncer pour les raisons suivantes :

- instabilité des peuplements de micro-organismes dont la dynamique est étroitement liée aux conditions du milieu (aération, composition du substrat, conditions de charge, ....) ;

- difficulté de transposer les enseignements recueillis aux installations de taille normale.

Face à cette situation, nous avons jugé intéressant d'orienter notre étude en retenant comme cadre expérimental un échantillon représentatif de stations d'épuration en vraie grandeur. Malgré la rigidité imposée, ce choix permet d'observer le comportement des micro-organismes dans leur milieu originel et offre de meilleures garanties quant à l'utilisation pratique des enseignements recueillis.

Le présent document a été élaboré à partir de cette démarche, il rassemble les résultats de nos différents travaux sur le foisonnement des boues activées.

Le premier chapitre constate l'ampleur du phénomène et analyse ses conséquences sur le fonctionnement des stations d'épuration. Nous mettons en évidence la nécessité de caractériser avec précision le foisonnement (intérêt de l'observation microscopique...).

L'étude bibliographique présentée au deuxième chapitre illustre la complexité du phénomène et décrit les mécanismes inducteurs du foisonnement. Cette étude révèle principalement l'importance des conditions nutritionnelles dans la compétition interspécifique qui règne au sein des boues activées. La seconde partie du chapitre est consacrée à l'exposé des moyens d'actions utilisables actuellement pour contrôler le foisonnement des boues.

Nous présentons en particulier, la technique de la zone de contact dont le principe consiste à recharger en nourriture le micro-environnement bactérien afin de favoriser le développement de germes non filamenteux.

Dans le troisième chapitre, nous étudions les relations nutritionnelles des micro-organismes en effectuant des mesures sur la biosorption des boues activées. Un échantillon de onze stations d'épuration à faible charge massique sert de cadre à nos essais. A l'aide des techniques classiques de l'analyse des données, nous essayons d'expliquer les variations de la biosorption en fonction des principaux paramètres concernant les boues et les eaux résiduaires. L'étude de la biosorption permet d'interpréter plus précisément les modes d'action intervenant dans les zones de contact.

Le quatrième chapitre concerne l'application de zones de contact sur le terrain. Il fait état des différents éléments à prendre en considération (examen approfondi de la station...) et détaille les résultats obtenus au cours du suivi de différents sites. L'ensemble des données permet de procéder à l'évaluation de cette technique.

Les enseignements recueillis pendant ces diverses expérimentations sont à l'origine de l'élaboration d'une méthodologie que nous proposons aux responsables et gestionnaires de stations d'épuration pour les guider dans leur choix de solutions opérationnelles et efficaces.

Le travail entrepris pour ce doctorat a été effectué à la Division Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture du CEMAGREF\* (Groupement de LYON) qui comprend différents laboratoires travaillant dans le domaine de l'eau ainsi qu'une équipe spécialisée dans le traitement des eaux résiduaires, dotée d'un matériel adapté pour les interventions sur sites réels (laboratoire mobile.....).

\* Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.



## CONCLUSION GENERALE.

\* Les difficultés de décantation engendrées par le développement excessif de micro-organismes filamenteux (foisonnement) dans les boues activées constituent un problème majeur qui limite les capacités de traitement des stations d'épuration. Les enquêtes entreprises à l'étranger montrent qu'environ 40 % des installations utilisant des boues activées sont sujettes de façon chronique ou transitoire au foisonnement.

Ce problème a été et reste encore pour certains l'objet de controverses qui s'expliquent par la complexité des mécanismes en jeu, mais aussi par la méconnaissance de la microbiologie des boues activées. En ce qui concerne ces deux derniers points, les recherches entreprises dans divers pays ont permis de réaliser des avancées certaines, principalement dans le domaine de l'identification des micro-organismes filamenteux. De plus, de récentes données sur les caractéristiques physiologiques de ces germes et leur mise en relation avec les conditions de fonctionnement des stations permettent de dégager deux principales sources au problème :

1/ l'importance du métabolisme bactérien pour les foisonnements provoqués par des effluents riches en sucres ou en composés soufrés réducteurs.

2/ l'influence des carences nutritionnelles (aggravées par les déficits en oxygène dissous) sur la compétition entre formes de croissance filamenteuse et non filamenteuse.

\* Nous nous sommes principalement intéressés à cette seconde source de problèmes car elle est, de loin, la plus fréquente et souvent la plus aiguë. Pour comprendre et expliquer les mécanismes qui gouvernent la compétition entre ces différents micro-organismes, notre démarche a consisté à analyser les relations nutritionnelles entre les micro-organismes et leur substrat nourricier par le biais de mesures sur la biosorption des boues.

Pour chaque couple (effluent-boue) testé selon un protocole déterminé, on observe que la biosorption croît en fonction de la charge appliquée, puis se stabilise et décroît, laissant présager un effet de saturation.

Ces courbes ont pu être ajustées à un modèle mathématique qui, compte tenu d'autres éléments d'appréciation, nous a permis de sélectionner un point caractéristique correspondant à une charge appliquée de 100 mg DCO/g MES.

Nous avons pu ainsi établir des comparaisons intéressantes à partir de l'étude d'un échantillon de 11 stations d'épuration sur lequel cinquante séries de mesures ont été réalisées in situ ; chaque couple testé étant caractérisé par 12 variables.

L'analyse des données révèle qu'en conditions normales de fonctionnement, la biosorption varie principalement avec l'indice de boue (caractéristique de la décantabilité de la boue).

En conditions limites, plus particulièrement en cas de déficit marqué en oxygène dissous, nous montrons que la biosorption est affectée négativement. Ces conditions sont susceptibles de modifier la dynamique des populations bactériennes avec pour résultante une détérioration de la décantabilité des boues.

De même, les variations brutales de certains paramètres physiques (pH, température) provoquent une chute importante de la biosorption.

\* Les résultats obtenus complètent les données bibliographiques en apportant de nouveaux éléments pour comprendre les modes d'action qui interviennent dans les zones de contact (récente technique proposée pour contrôler le foisonnement dans les stations d'épuration à faible charge massique).

L'action sélective des zones de contact se manifesterait selon les modalités suivantes :

- Dans le bassin d'aération, si le micro-environnement bactérien est partiellement carencé en matière organique, les germes filamenteux sont favorisés et dominant. Placés dans des conditions analogues, les germes floculants ont un métabolisme ralenti.

- La configuration zone de contact crée artificiellement un milieu plus riche en substrat disponible qui stimule la vitesse de capture de la nourriture des germes floculants leur permettant ensuite d'avoir un taux de croissance supérieur à celui des formes filamenteuses. Notre argumentation suppose que les germes filamenteux conservent une vitesse de capture plus lente, ce que confirment les travaux de VAN DEN EYNDE, CHUDOBA, ....

\* Parallèlement à l'étude de la biosorption des boues activées, nous avons procédé à l'application pratique de zones de contact sur le terrain afin d'évaluer cette technique.

Les résultats prometteurs obtenus sur deux stations d'épuration ont été confirmés par le suivi de la zone de contact préconisée pour résoudre le problème de la station d'épuration de VENCE (06), qui traite des effluents domestiques dans un bassin à boues activées en aération prolongée. Dans ce cas, les paramètres de fonctionnement de la zone de contact étaient les suivants : temps de contact minimum de 10 minutes, charge maximale de 80 mg DCO/g MES.

Cette technique s'avère efficace et fiable pour contrôler la croissance de filaments caractéristiques des stations à faible charge (type 0092, 0041 - classification d'EIKELBOOM). Elle présente, en outre, l'avantage de minimiser les contraintes d'exploitation et reste compétitive sur le plan économique par rapport à d'autres solutions.

Le choix de la solution "zone de contact" pour maîtriser le foisonnement implique, d'une part la détermination précise des germes filamenteux en cause, et d'autre part que la quantité de substrat retenue dans la zone soit importante. Cette deuxième condition nécessite la réalisation in situ de tests de biosorption qui simulent les processus intervenant dans la dite zone de contact ; les données ainsi recueillies permettent de fixer les critères de dimensionnement et de fonctionnement.

\* Les multiples expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse nous ont permis d'élaborer et de tester une méthodologie pour maîtriser le foisonnement. Cette démarche pragmatique peut désormais être proposée aux gestionnaires pour les aider à faire face aux difficultés liées au foisonnement des boues.

Elle repose sur :

a) La caractérisation précise du problème (type de filaments, indice de boue, origine des difficultés, ...).

b) L'étude détaillée du fonctionnement de la station afin de déceler d'éventuelles anomalies et des facteurs aggravants (conditions de charge, mesures de biosorption, analyse du dimensionnement et du fonctionnement...).

c) Le choix de solution (s) adaptée (s) aux contraintes locales.

\* En conclusion, l'étude entreprise apporte une contribution à la connaissance des mécanismes du foisonnement et permet de dégager des solutions pour maîtriser ce problème biologique qui reste néanmoins, complexe.

Des recherches complémentaires sur les conditions nutritionnelles des micro-organismes présents dans les boues activées complèteraient avantageusement le présent travail. Dans cette optique, les orientations les plus prometteuses nous paraissent être les suivantes :

- étude des relations biosorption-types de filaments, biosorption-charge massique ;

- étude fondamentale des mécanismes de la biosorption = dissociation des phénomènes physiques et biologiques, influence de la nature des particules en suspension.