UNIVERSITE DE MONTREAL

CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DE LA BIO-CINETIQUE D'ENLEVEMENT DES POLLUANTS C/N/P DANS UN "REACTEUR BIOLOGIQUE SEQUENTIEL" OPERE A FAIBLE CHARGE

par

Carole DUMAS
DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE
ECOLE POLYTECHNIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAITRE EN SCIENCES APPLIQUEES (M.Sc.A.)

Juillet 1990

c Carole Dumas, 1990

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58939-6

Canada

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DE LA BIO-CINETIQUE D'ENLEVEMENT DES POLLUANTS C/N/P DANS UN "REACTEUR BIOLOGIQUE SEQUENTIEL" OPERE A FAIBLE CHARGE

Présenté par : Carole Dumas

en vue de l'obtention du grade de : M.Sc.A.

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Claude Chavarie	Ph. D., président-rapporteur
M. Jamal Chaouki	Ph. D.
M. Raymond Mayer	M.Sc.A. directeur

A Eric

SOMMAIRE

Les travaux présentés ont été consacrés au suivi des polluants carbonés, azotés et phosphorés dans un réacteur biologique séquentiel (RBS), alimenté par une eau municipale faiblement chargée en carbone.

Une approche originale pour la période de remplissage est utilisée. Elle emprunte la notion de "sélecteur", opération consistant à remplir le RBS , depuis un bassin d'égalisation, sur une courte période (15 minutes).

Les 9 mois d'opération continue du RBS ont apporté des résultats prometteurs. La biomasse s'est bien adaptée et a conservé, tout au long de l'étude, de bonnes qualités de décantation permettant l'obtention d'un effluent libre de solides en suspension.

La séquence donnant les meilleurs rendements d'enlèvement des polluants dans notre RBS de 15 litres est constituée d'une période de remplissage de 15 min. d'une période de réaction non aérée de 135 min., d'une période de réaction aérée de 125 min. (incluant une purge de liquide mixte), d'une décantation de 60 min. suivie d'une purge du surnageant de 30 min..

Cette séquence montre un rendement maximal au niveau de l'enlèvement du carbone, représenté par une DBO de 7 ± 5 mg/L à la sortie. La période de réaction aérée permet

une nitrification complétée à 95%. Le taux spécifique de nitrification suit une cinétique d'ordre 1 par rapport à l'azote ammoniacal et est indépendant de la croissance biologique. La dénitrification est observée durant les trente premières minutes de la période de réaction non aérée. La présence ou non de dénitrification est directement reliée à la disponibilité du carbone. Le phosphore est consommé pour la synthèse biologique seulement, sauf à quelques exceptions. Lorsque les nitrates sont en faibles concentrations (moins de 1 mg/L) durant la période de réaction non aérée, un enlèvement du phosphore par sur-accumulation est remarqué.

ABSTRACT

This report studies the evolution of carbonated, nitrogenous and phosphorus polluting agents in a sequencing biological reactor (SBR) fed by a municipal wastewater with a low carbon concentration.

An original approach for the feeding phase has been used. It involves the use of a "selector", a unit operation consisting in feeding the SBR on a very short time (15 minutes) owing to the use of a storage tank.

The 9 months of continuous operation have given promising results. The biomass was very adaptive and remained easy to decant during the entire study, allowing the obtention of a particule free effluent.

The sequence allowing the best disposal yields in our 15 L SBR of polluting agents consists of a 15 min. feeding time, 135 min. non-aerated reaction, 125 min. aerated reaction (with draining of mixed liquor), and a 60 min. decantation followed by a 30 min. draining of the supernatant.

A 95% yield for the elimination of carbon is obtained with this sequence, the resulting effluent showed a BOD of 7 ± 5 mg/L. 95% of the nitrification removal is completed during the aerated reaction period. The specific rate of nitrification followed a first-order kinetic with respect

to ammoniacal nitrogen and this specific rate is independant of the biological growth. Denitrification is observed during the first 30 min. of non-aerated reaction. The denitrification operation is directly linked to the availability of carbon. Phosphorus is generaly consumed for the biological synthesis. For the low concentrations of nitrates (< 1 mg/L), the phosphorus is removed by luxury uptake.

REMERCIEMENTS

Quand on termine un projet de cet envergure, on a toujours une bonne pensée pour ceux qui nous ont appuyé, que ce soit matériellement, par leurs encouragements ou par leur précieux conseil. Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Raymond Mayer, mon collaborateur durant ces recherches, François Roberge ainsi que Jean-Serge Larente qui a assuré l'approvisionnement en eau usée 2 fois par semaine.

J'adresse également des remerciements au Conseil national de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour les bourses d'études qu'il m'a allouées.

J'aimerais aussi souligner le support financier au projet du Centre québécois de valorisation de la biomasse (CQVB), du Centre St-Laurent et de la Société québécoise d'assainissement des eaux (SQAE).

TABLE DES MATIERES

Sommaire v

Abstract vii

Remerciements ix

Liste des tableaux xiii

Liste des figures xv

Liste des annexes xviii

Liste des symboles xix

Chapitre 1: Introduction 1

Chapitre 2: Revue bibliographique 4

2.1 Enlèvement des polluants carbonés, azotés et phosphorés 4

2.1.1 Enlèvement des polluants carbonés 4

2.1.2 Enlèvement des polluants azotés 5

2.1.2.1 La nitrification 6

2.1.2.2 La dénitrification 9

2.1.3 Enlèvement des polluants phosphorés 12

2.2 Réacteurs utilisés en continu 18

2.3 Réacteur biologique séquentiel (RBS) 21

2.4 Opération des RBS 25

2.4.1 Stratégies de remplissage 25

2.4.2 Périodes de réaction 28

2.4.3 Décantation et purge du surnageant 29

2.4.4 Affluent faiblement chargé en carbone ... 29

Chapitre 3: Matériels et méthodes 31

3.1 Eau usée à traiter 31

3.2 Description d'une séquence modèle 32

3.3 Séquences étudiées 34

3.3.1 Etape A 34

3.3.2 Etape B 35

3.3.3 Etape C 35

3.4 Paramètres étudiés 36

3.4.1 Caractérisation globale sur les courants. 36

3.4.2 Comportement des polluants au cours d'un cycle 37

3.5 Description du montage expérimental 38

3.5.1 Le RBS et ses périphériques 40

3.5.2 Le logiciel de contrôle et d'acquisition de données 41

Chapitre 4: Résultats et discussions 45

4.1 Etude des courants entrée et sortie 45

4.1.1 Enlèvement du carbone 53

4.1.2 Caractéristiques de la biomasse 53

4.1.3 Enlèvement de l'azote 55

4.1.4 Enlèvement du phosphore 59

4.1.5 Enlèvement des solides en suspension 64

4.2 Cinétique au cours d'un cycle type 64

4.2.1 Présentation d'un profil type (cycle 404, étape C) 65

4.2.2 Périodes de réaction non aérée et aérée . 69

4.2.2.1 Evolution de la biomasse 69

4.2.2.2 Evolution du carbone 71

4.2.2.3 Evolution de l'azote 72

4.2.2.4 Evolution du phosphore 78

4.2.3 Période de remplissage 78

4.2.4 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape A 81

4.2.5 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape B 86

4.2.6 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape C 92

Chapitre 5: Conclusions et recommandations 102

Références Bibliographiques 106

Annexes 112

LISTE DES TABLEAUX

2.1.1 Définition des termes aérobie, anoxie, anaérobie 14

2.4.1 Stratégies de remplissage (Maning et al, 1985) 26

3.3.1 Périodes de réaction des étapes A, B, C 36

3.4.1 Variables étudiées 38

4.2.1 Caractéristiques des phases d'une séquence ... 66

4.2.2 Constantes de nitrification du cycle 404 74

4.2.3 Résultats d'échantillonnage, cycle 108, étape A 82

4.2.4 Résultats d'échantillonnage, cycle 290, étape A 83

4.2.5 Constantes cinétiques du cycle 290, étape A .. 85

4.2.6 Résultats d'échantillonnage, cycle 103, étape B 87

4.2.7 Résultats d'échantillonnage, cycle 214, étape B 88

4.2.8 Constantes cinétiques des cycles 103 et 214, étape B 91

4.2.9 Résultats d'échantillonnage, cycle 316, étape C 93

4.2.10 Résultats d'échantillonnage, cycle 404, étape C 94

4.2.11 Résultats d'échantillonnage, cycle 428,

étape C 95

4.2.12 Constantes cinétiques des cycles 316, 404 et 428, étape C 99

A3.1 Affluent, étape A 133

A3.2 Effluent, étape A 134

A3.3 Liquide mixte, étape A 135

A3.4 Affluent, étape B 136

A3.5 Effluent, étape B 137

A3.6 Liquide mixte, étape B 138

A3.7 Affluent, étape C 139

A3.8 Effluent, étape C 140

A3.9 Liquide mixte, étape C 141

LISTE DES FIGURES

2.1.1 Effet du pH sur la nitrification 8

2.1.2 Effet de la température sur la nitrification. 8

2.1.3 Modèle biochimique anaérobie simplifié d'une bactérie déphosphatante 15

2.1.4 Modèle biochimique aérobie simplifié d'une bactérie déphosphatante 15

2.1.5 Corrélation entre le phosphore absorbé en aérobie et le phosphore relargué en anaérobie 16

2.2.1 Le procédé à boues activées conventionnel ... 20

2.2.2 Le réacteur Bardenpho 20

2.2.3 Le réacteur Bardenpho modifié 20

2.2.4 Le réacteur Phoredox à trois stages 20

2.3.1 Diagramme d'opération typique d'un RBS 23

2.4.1 Influence du carbone sur le relargage du phosphore 27

3.2.1 Séquences étudiées 32

3.5.1 Montage expérimental 39

3.5.2 Organigramme simplifié du logiciel de contrôle et d'acquisition de données 44

4.1.1 Les courants d'entrée et de sortie du RBS ... 46

4.1.2 Evolution de la DCO avec le nombre de cycles, étapes A, B, C 47

4.1.3 Evolution de la biomasse avec le nombre de

cycles, étapes A, B, C 48

4.1.4a Evolution de l'azote avec le nombre de cycles, étape A 49

4.1.4b Evolution de l'azote avec le nombre de cycles, étape B 50

4.1.4c Evolution de l'azote avec le nombre de cycles, étape C 51

4.1.5 Evolution du phosphore avec le nombre de cycles, étapes A, B, C 52

4.1.6 Evolution des taux spécifiques de dénitrification (q_d) avec le nombre de cycles, étapes B et C 58

4.1.7 Simulation du phosphore à la sortie du RBS condérant qu'il n'y a pas de déphosphatation par voie biologique, étape C 63

4.2.1 Evolution de la concentration en oxygène dissous en fonction du temps durant le cycle 404, l'étape C 66

4.2.2 Evolution de la biomasse en fonction du temps durant le cycle 404, l'étape C 67

4.2.3 Evolution du carbone en fonction du temps durant le cycle 404, l'étape C 67

4.2.4 Evolution de l'azote en fonction du temps durant le cycle 404, l'étape C 68

4.2.5 Evolution du phosphore en fonction du temps

durant le cycle 404, l'étape C 68

4.2.6 Relation entre N-NO3 et N-NH4 durant le cycle 404, l'étape C 77

4.2.7 Estimation des N-NH4 et N-NO3 en fonction du temps durant la période de réaction aérée du cycle 404, l'étape C 77

4.2.8 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 290, étape A 84

4.2.9 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 103, étape B 89

4.2.10 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 214, étape B 90

4.2.11 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 316, étape C 96

4.2.12 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 404, étape C 97

4.2.13 Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 428, étape C 98

A4.1 Bactéries filamenteuses, Type 1701 143

A4.2 Protozoaire, "Ciliés pertriches": Suctoria. 143

A4.3 Protozoaire, "Ciliés pertriches": Vorticella 144

A4.4 Métazoaire, Rotifère 144

A4.5 Morphologie du floc: Ferme et irrégulière .. 145

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Analyses effectuées 112

Annexe 2: Logiciel de contrôle et d'acquisition de données 116

Annexe 3: Résultats d'analyse recueillis au cours des 3 étapes: affluent, effluent, liquide mixte 132

Annexe 4: Photos prises au microscope 142

LISTE DES SYMBOLES

b_0	Constante = taux spécifique d'utilisation du substrat, [mg C/mg SVS/temps]
b_1	Constante de l'expression du taux spécifique d'utilisation du substrat d'ordre 1,[L/mgSVS/temps]
b_2	Constante de l'expression du taux spécifique d'utilisation du substrat d'ordre 2,[L^2/mg C/mg SVS/temps]
C	Concentration d'un substrat [mg/L]
DBO	Demande biologique en oxygène, [mg/L]
DCOs	Demande chimique en oxygène soluble, [mg/L]
DCOt	Demande chimique en oxygène totale, [mg/L]
IVB	Indice du volume des boues, [ml/g]
Kn	Constante de taux de moitié de l'équation de Monod [mg/L]
μ	Taux spécifique de croissance, [1/temps]
$N\text{-}NH_4$	Concentration en azote mesurée sous forme ammoniacale, [mg/L]
$N\text{-}NO_3$	Concentration en azote mesurée sous forme de nitrates, [mg/L]
NTK	Azote total kjeldahl (azote organique + $N\text{-}NH_4$), [mg/L]
$P\text{-}PO_4$	Phosphore mesuré sous forme d'ortho-phosphates, [mg/L]

q_d	Taux spécifique de dénitrification, [mg N-NO_3/mg SVS/temps]
q_n	Taux spécifique de nitrification, [mg N-NH_4/mg SVS/temps]
Q	Débit, [L/temps]
R_d	Taux de dépérissement de biomasse, [mg SVS/L/temps]
R_x	Taux de production de biomasse, [mg SVS/L/temps]
SES	Solides en suspension, [mg/L]
SVS	Solides volatils en suspension, [mg/L]
t	Temps, [jours, heures]
TRC	Temps de résidence des cellules dans le RBS, [jours]
V	Volume, [L]
X	Biomasse, [mg/L]
$Y_{N/X}$	Rapport stoechiométrique azote/biomasse, [mg/mg]
$Y_{P/X}$	Rapport stoechiométrique phosphore/biomasse, [mg/mg]

Indices:

e	Courant d'entrée
LM	Liquide mixte
s	Courant de sortie
SU	Surnageant

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

Les eaux usées des municipalités québécoises sont caractérisées par leur faible contenu en carbone. Cette rareté en carbone pose un problème au niveau de l'opération même du réacteur de bio-traitement. Il en résulte des conditions qui favorisent la défloculation de la biomasse et/ou une trop grande production de bactéries filamenteuses; la qualité de l'effluent décanté est alors affectée. De plus, le carbone est essentiel à l'enlèvement par voie biologique d'autres polluants tels l'azote et le phosphore.

Le réacteur biologique séquentiel (RBS) a fait ses preuves; sa flexibilité permet d'inclure des phases non aérées limitant la prolifération de ces bactéries.

Les RBS en opération dans les industries agro-alimentaires caractérisées par un effluent à haute charge organique ou dans les municipalités à moyenne charge montrent d'excellents résultats tant au niveau de l'enlèvement de l'azote que celui du phosphore. Pour ce qui est des effluents faiblement chargés en carbone, les résultats sont décevants.

Le réacteur biologique séquentiel se définit comme un réacteur de type "fill and draw" dans lequel toutes les opérations standards de traitement des eaux sont

effectuées. Le réacteur est rempli durant une certaine période, puis il est opéré en mode cuvée pendant la période de réaction. Après le traitement, la biomasse est décantée et le surnageant retiré du réacteur. La biomasse demeure dans le bassin en vue du cycle suivant qui débute par le remplissage. L'eau arrivant en continu à la station d'épuration d'une municipalité est orientée vers un RBS en phase de remplissage. Selon la dimension des bassins et le débit d'arrivée d'eau, 3 à 4 RBS opérés en parallèle suffisent au traitement de toute l'eau usée d'une journée.

L'approche originale du mode d'opération du RBS se situe au niveau du remplissage. Le réacteur est rempli de façon quasi-instantanée à partir d'un bassin d'égalisation. Ceci a pour conséquence de minimiser les effets de dilution liés à un remplissage de plus longue durée (2 heures) tout en permettant un meilleur contact entre la biomasse et le substrat disponible. L'effet sélecteur est réalisé par un bassin, sans activité biologique, dans lequel l'eau, arrivant en continu, est stockée jusqu'au moment du remplissage avant d'être déversée très rapidement (15 min.) dans le RBS.

En plus de déterminer si l'ajout du sélecteur permet l'enlèvement du carbone, de l'azote et du phosphore d'une eau municipale réelle faiblement chargée en carbone et

permet l'obtention d'un effluent libre de matières en suspension, les objectifs de ce travail sont la caratérisation du comportement des polluants carbone, azote et phosphore durant chacune des phases d'une séquence d'opération du RBS. Trois séquences d'opération du RBS seront étudiées, visant les buts suivants:

A) caractérisation de l'enlèvement du carbone, en période de réaction aérée,

B) caractérisation de l'enlèvement du carbone et de l'azote par l'alternance de périodes de réaction aérée, non aérée et aérée,

C) caractérisation de l'enlèvement du carbone, de l'azote et du phosphore par la succession de périodes de réaction non aérée et aérée.

CHAPITRE 2: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Enlèvement des polluants carbonés, azotés et phosphorés

2.1.1 Enlèvement des polluants carbonés

Les procédés biologiques sont connus depuis très longtemps pour leur capacité à oxyder les polluants carbonés des eaux usées. Le carbone présent dans l'eau peut se retrouver sous une forme soluble ou insoluble. La partie soluble passe directement à travers les parois cellulaires et est métabolisée très rapidement. Le carbone disponible sous forme colloïdale ou particulaire (non soluble) est absorbé et stocké très rapidement sur les microorganismes. Par la suite, le carbone stocké est hydrolysé par des enzymes extra-cellulaires puis assimilé de la même manière que le carbone soluble. (Ekama et Marais, 1984a).

L'enlèvement, par voie biologique du carbone d'une eau municipale faiblement chargée ne pose pas de problème. Il n'est pas nécessaire de détailler plus en profondeur les réactions biologiques ou les prodédés disponibles, étant donné que le choix du RBS est basé sur le critère de

ses possibilités d'enlèvement des deux autres polluants plus complexes à éliminer: l'azote et le phosphore.

2.1.2 Enlèvement des polluants azotés

L'azote contenu dans les eaux usées municipales se retrouve principalement sous forme d'ions ammonium. Ceux-ci doivent être éliminés avant rejet de l'effluent au cours d'eau récepteur, car ils contribuent à l'appauvrissement en oxygène dissous du milieu lors de leur métabolisation par les microorganismes aquatiques.

La nitrification se définit comme la transformation de l'azote ammoniacal, par voie biologique, en oxyde d'azote en présence d'oxygène dissous. Ces derniers sont à leur tour transformés par dénitrification en azote gazeux, en absence d'oxygène dans le milieu.

L'efficacité d'enlèvement d'azote est proportionnelle au degré d'achèvement de la dénitrification. Selon Shammas (1986), l'étape limitante est la nitrification puisqu'elle est la plus sensible aux conditions environnementales tels le pH, la température et la concentration en oxygène dissous.

2.1.2.1 La nitrification

La nitrification est connue depuis environ 100 ans et elle est beaucoup utilisée dans le domaine du traitement des eaux usées. Les étapes de transformation sont donc bien connues.

Les bactéries responsables de la nitrification sont des autotrophes. Les bactéries du genre *Nitrosomonas* transforment l'ammoniaque libre en nitrites. Les *Nitrobacter* les reprennent et les modifient en nitrates. Ces bactéries utilisent l'ammoniaque à la fois comme azote nécessaire à leur synthèse et comme source d'énergie reliée à cette synthèse. Selon Ekama et Marais (1984b), l'ammoniaque utilisé pour la synthèse représente au plus 2 % de l'azote total transformé par les bactéries nitrifiantes. De plus, le pourcentage de ces bactéries excède rarement 2 à 4% de toute la biomasse du système à boues activées. (Alleman 1980).

En conséquence les réactions décrivant le métabolisme des nitrifiantes sont souvent négligées, les bactéries sont uniquement considérées comme catalyseur de la nitrification. La nitrification est représentée par les deux équations chimiques suivantes:

$$2\ NH_4^+ + 3\ O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} 2\ NO_2^- + 2\ H_2O + 2\ H^+ \quad (2.1)$$

$$2\ NO_2^- + O_2 \quad \text{--Nitrobacter->}\ 2\ NO_3^- \qquad (2.2)$$

Selon la stoechiométrie de ces réactions, il faut fournir 4.57 mg d'oxygène par mg d'azote ammoniacal ($N-NH_4$) transformé. Irvine et Busch (1979) ont trouvé que la concentration en oxygène dissous devait être supérieure à 1 mg/L dans le milieu de culture pour favoriser la nitrification.

Les bactéries nitrifiantes sont très sensibles aux conditions environnementales. Shammas (1986) a fait une revue des valeurs de pH et de températures optimales trouvées par différents auteurs. Les données sont reproduites aux figures 2.1.1 et 2.1.2. Tous les auteurs s'entendent pour dire qu'un pH entre 8 et 9 maximise le taux de nitrification. 30°C semble être la température optimale pour la plupart des auteurs, seul Borchardt (1966) a trouvé un plateau maximum entre 15 et 35°C.

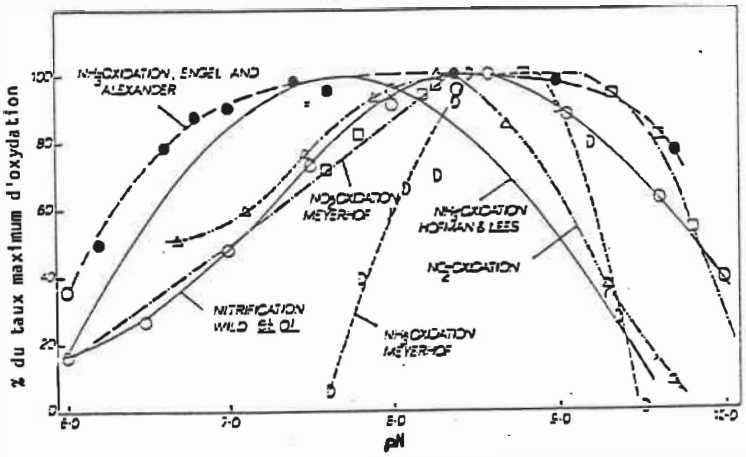


Figure 2.1.1: Effet du pH sur la nitrification (adapté de Shammas 1986)

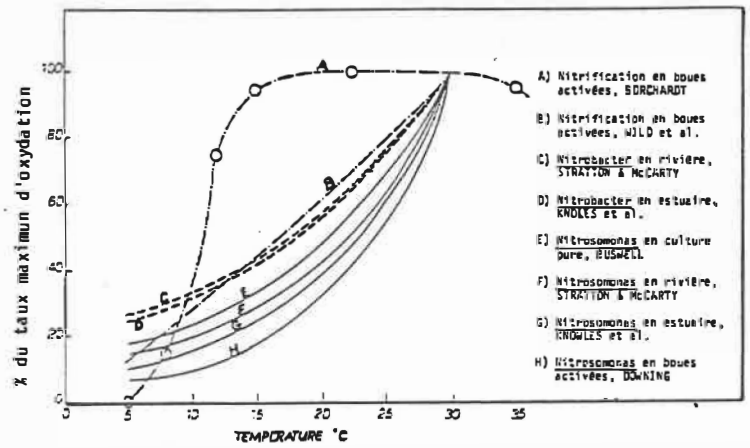


Figure 2.1.2: Effet de la température sur la nitrification,(adapté de Shammas 1986)

La nitrification induit une libération de protons dans le milieu, contribuant à diminuer l'alcalinité. Zaloum et ses collaborateurs (1985) ont déterminé que l'alcalinité consommée est de 3.5 à 7.87 mg de $CaCO_3$ par mg de NO_2-NO_3 formés.

L'âge des boues minimum des bactéries nitrifiantes dans le réacteur est fonction de la température. Selon les constantes cinétiques déterminées par Ekama et Marais (1984b), il faut considérer 4.1 jours à 20°C et 7.9 jours à 15°C comme temps de résidence des cellules dans le réacteur. Ces valeurs sont déterminées par l'équation suivante:

$$TRc = Sf / (r_{nmT} - b_{nT}) \qquad (2.3)$$

où TRc : Temps de résidence des cellules
Sf : facteur de sécurité : 1.3
r_{nmT}: taux spécifique de croissance des nitrifiantes: $r_{nmT} = 0.36 * 1.123^{(T-20)}$
b_{nT}: taux de respiration endogène: $b_{nT} = 0.04 * 1.029^{(T-20)}$

2.1.2.2 La dénitrification

Il existe plusieurs méthodes d'élimination des nitrates: les échangeurs d'anions, l'osmose inverse, l'électrodialyse et la distillation. Mais la dénitrification biologique se présente comme le procédé le plus économique (Dahab et Lee 1988).

La dénitrification est effectuée par des bactéries hétérotrophes facultatives en présence d'une source de carbone et en absence d'oxygène. Dans des conditions anoxies (absence d'oxygène et présence de nitrates) les bactéries utilisent les nitrates comme accepteur final d'électron lors de l'oxydation du carbone qui sert à la fois comme matériau de synthèse et comme source d'énergie.

Comme la production d'énergie liée à une oxydation aérobie est supérieure à celle fournie par consommation des nitrates, il est donc essentiel de proposer un environnement anoxie pour permettre la dénitrification (Abufayed et Schroeder, 1986b). Carson (1971) a démontré qu'en absence totale d'oxygène dissous, le taux d'enlèvement des nitrates peut être de 100%, tandis qu'à 0.2 mg/L (2 à 10% de saturation) d'oxygène dissous, il n'y a pas eu de dénitrificaiton significative.

Selon Ekama et Marais (1984c), lorsque des bactéries, produites en conditions aérobies, sont soumises à des conditions favorables, elles démontrent immédiatement des capacités à dénitrifier sans modification apparente de leur réactivité.

Diverses sources de carbone peuvent satisfaire les bactéries durant la dénitrification. Souvent, les modèles sont développés à partir d'une source externe de carbone, par exemple, par l'ajout de méthanol dans le milieu. Beer

et Wang (1978) ont développé des réactions impliquant le carbone d'une eau usée municipale durant la respiration des nitrates. Lors de la respiration endogène, la biomasse est utilisée comme carbone.

Mc Carty (1970) propose d'utiliser les formules stoechiométriques suivantes: pour la biomasse, $C_5H_7O_2N$ et pour le substrat, $C_{10}H_{19}O_3N$.

Respiration des nitrates en présence de substrat: (2.4)

$$C_{10}H_{19}O_3N + 6.5\ NaNO_3 \rightarrow 0.125\ NH_3 + 5.625\ CO_2 + 6.5\ NaOH + 0.875\ C_5H_7O_2N + 3.25\ N_2 + 3\ H_2O$$

Respiration endogène en absence de substrat: (2.5)

$$C_5H_7O_2N + 4\ NaNO_3 + H_2O \rightarrow 4\ NaHCO_3 + NH_4HCO_3 + 2\ N_2$$

La dernière équation représente en fait une très faible partie des nitrates décomposés. La capacité de dénitrification se démontre principalement par les conditions limitantes et non limitantes en carbone (Abufayed et Schroeder 1986a). Selon Christensen et Harremoes (1977), il faut prévoir un rapport DCO/N-NO_3 de 3.75 à 11.25 mg/mg. Si la concentration en carbone (DCO) se trouve en deça de ce rapport critique, la dénitrification ne peut avoir lieu.

La dénitrification contribue à faire augmenter l'alcalinité. Selon la stoechiométrie, pour chaque mg

d'azote mesuré comme nitrates ($N-NO_3$) dénitrifié, 3.57 mg d'alcalinité évalué en $CaCO_3$ sont produits.

2.1.3 Enlèvement des polluants phosphorés

Contrairement aux polluants carbonés et azotés, les phosphores ne peuvent pas être réduits en matières volatiles inertes comme le CO_2 et le N_2. L'enlèvement du phosphore ne peut se faire que par passage des phosphates d'une phase aqueuse (eau usée) vers un milieu solide dont on peut ensuite disposer. La méthode la plus couramment utilisée est une précipitation des phosphates à l'aide d'alun ou de chlorure ferrique. Cette technique en plus d'être coûteuse du fait des produits chimiques qu'elle requiert, doit prévoir une procédure de disposition des boues chimiques. Selon Audic et al (1987), les quantitée de boues produites peuvent atteindre 10 Kg par Kg de phosphore éliminé.

Selon Comeau (1990), la déphosphatation biologique consiste à accumuler le phosphore dans les bactéries au-delà des besoins métaboliques de croissance.

Les premiers auteurs à avoir constaté l'enlèvement du phosphore par voie biologique furent Srinath et al (1959) en Inde et Alarcon (1961) en Amérique. Par la suite, Levin et Shapiro (1965) ont pu commencer à expliquer le

phénomène de la déphosphatation. Ils ont remarqué que lorsqu'une biomasse était laissée sans aération, il y avait un relargage de phosphore dans le milieu. Ils ont également montré qu'en présence d'oxygène et de sucre, le taux d'utilisation du phosphore était plus grand que celui relié seulement à la croissance.

Les mécanismes de relargage et de captage du phosphore au niveau de la cellule sont détaillés par Comeau et al (1986, 1987, 1990). Seuls des modèles biochimiques simplifiés sont présentés ici.

Les phénomènes mis en jeu sont complexes, les réactions se produisant en conditions aérobies peuvent être séparées schématiquement de celles s'effectuant en conditions anaérobies.

Dans le domaine du traitement des eaux, les termes aérobie, anoxie et anaérobie se distinguent au niveau de la présence ou non d'oxygène dissous et de nitrates dans le milieu de culture. Le tableau 2.1.1 en résume les définitions.

Tableau 2.1.1: Définition des termes aérobie, anoxie et anaérobie

	Présence d'oxygène dissous	Présence de nitrates
Aérobie	oui	oui / non
Anoxie	non	oui
Anaérobie	non	non

Dans des conditions anaérobies (figure 2.1.3), le carbone facilement assimilable tel l'acétate et le propionate est transporté à travers la membrane cellulaire puis stocké sous la forme de polymère intra-cellulaire, le PHA (poly-ß-hydroxy-alcanoate). Ce processus est possible grâce à la dégradation des polyphosphates qui en même temps fournissent de l'énergie et libèrent du phosphore, comme $P\text{-}PO_4$ dans le bio-réacteur.

En conditions aérobies (figure 2.1.4), l'oxydation de matières organiques externes puis internes peut permettre la production d'énergie nécessaire à la croissance biologique, au transport des phosphates et à leur stockage. Le même phénomène pourrait se produire en conditions anoxies dans le cas de certaines bactéries.

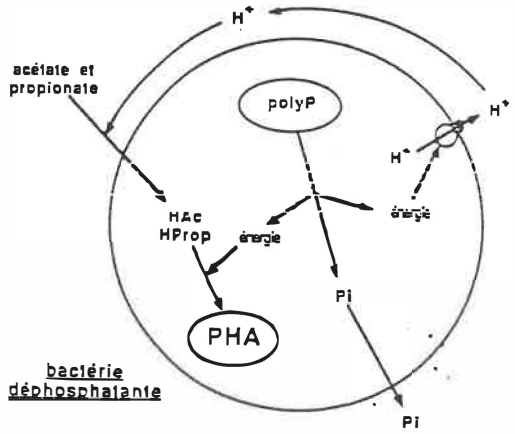


Figure 2.1.3
Modèle biochimique anaérobie simplifié d'une bactérie déphosphatante (Comeau 1990)

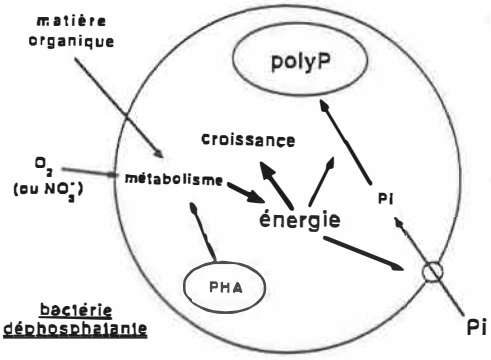


Figure 2.1.4
Modèle biochimique aérobie simplifié d'une bactérie déphosph. (Comeau 1990)

Abréviations: H^+: ion hygrogène ou proton,
HAc: acide acétique
HProp: acide propionique
Pi: phosphates
PHA: poly-ß-hydroxyalkanoates

Il existe une étroite dépendance entre les réactions débutant dans des conditions anaérobies et celles se terminant dans des conditions aérobies. La figure 2.1.5 montre un graphique proposant une relation directe entre le phosphore relargué et le phosphore absorbé par la biomasse.

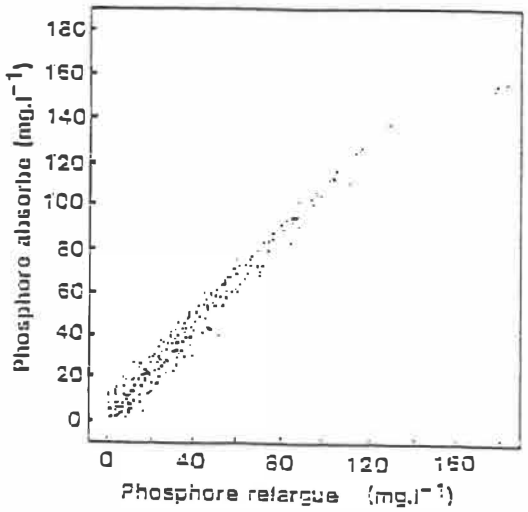


Figure 2.1.5: Corrélation entre le phosphore absorbé en aérobie et le phosphore relargué en anaérobie (Audic et al 1987)

Les premières bactéries identifiées par Fush et Chen (1975) à accumuler les polyphosphates sont du genre *Acinetobacter*. En 1977, Osborn et Nicholls ont découvert que le phosphore était aussi accumulé en conditions anoxies. Comme *Aninetobacter* est obligatoirement aérobie, ils suggèrent donc que les bactéries facultatives dénitrifiantes peuvent jouer un rôle dans l'enlèvement du phosphore. Brodisch et Joyner (1983) ont prouvé que les bactéries du genre *Acinetobacter* sont présentes en minorité. D'autres organismes des genres *Aeromonas* et *Pseudomonas* peuvent constitués plus de 50% de la faune bactérienne déphosphatante.

D'après EPA (1987), des études ont été effectuées sur une culture pure d'*Acinetobacter*, permettant de noter une sur-accumulation de phosphore par les bactéries lorsque de l'acétate est alimenté au bio-réacteur. Ils concluent que

la phase anaérobie est très importante pour produire des hydrocarbures simples comme l'éthanol, l'acétate et le succinate qui servent comme source de carbone à la bactérie bio-déphosphatante. L'acétate et les autres composés simples sont produits par fermentation normale en présence de bactéries facultatives durant la période anaérobie.

La période anaérobie est essentielle pour induire l'enlèvement du phosphore. Elle doit donc précéder la période aérobie dans laquelle le captage du phosphore se fait.

Selon Manning et Irvine (1985), l'enlèvement du phosphore dépend en priorité de l'enlèvement des NOx du système. Les nitrates ont pour effet de diminuer le rapport net de DBO/P. Une partie du substrat est consommé pour la dénitrification plutôt que d'être stocker par les bactéries bio-déphosphatantes (Comeau, 1986). L'efficacité de l'enlèvement biologique du phosphore total diminue de 90 à 55% lorsque la concentration de NOx dans l'effluent augmente de 4.0 à 6.7 mg/L dans un procédé Bardenpho modifié (procédé détaillé plus loin). Un autre chercheur (EPA, 1987) a trouvé que 3.6 mg DCO est nécessaire pour réduire 1 mg de nitrate lors de la nitrification.

Le potentiel d'une eau à assurer une élimination du phosphore est une fonction directe de la quantité de

carbone susceptible d'être convertie en acétate puis en PHB sous les conditions d'anaérobiose (Audic, 1987).

2.2 Réacteurs utilisés en continu

Les premiers bio-réacteurs destinés à l'enlèvement de l'azote et du phosphore ont comme base le réacteur à boues activées conventionnels (fig. 2.2.1). Celui-ci n'étant composé que d'un bassin aéré, il permet seulement l'enlèvement du carbone et la nitrification. Le décanteur a pour objectif de séparer l'eau clarifiée de la biomasse à retourner au réacteur.

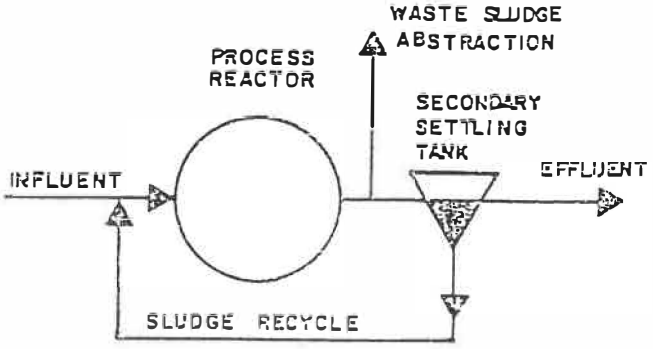
Barnard (1983) a fait une revue de l'évolution des réacteurs capables d'effectuer l'enlèvement du phosphore. Le réacteur Bardenpho (fig. 2.2.2) initial permettait la nitrification et la dénitrification. Une partie du liquide mixte sortant du deuxième bassin aérobie est recyclée dans le premier bassin anoxie ou la majorité des nitrates en présence de carbone sont dénitrifiés. Le deuxième bassin anoxie sert à compléter la dénitrification. Le dernier bassin aère à nouveau la biomasse avant son passage dans le décanteur. Ce réacteur élimine complètement l'azote et même le phosphore, dans certains cas, lorsque le deuxième bassin anoxie est en fait anaérobie.

En ajoutant un bassin anaérobie en tête de procédé, le réacteur Bardenpho modifié effectue la déphosphatation biologique de façon plus fiable (fig. 2.2.3).

Comme le dernier bassin anoxie n'enlevait pratiquement pas de nitrates, il a été supprimé par Simpkins et McLaren en 1978, le procédé devient le Phoredox à 3 étages (figure 4.2.4). Ils ont conclu que le premier réacteur anaérobie est essentiel à l'enlèvement en excès du phosphore, que les nitrates recyclés nuisent à l'enlèvement du phosphore et finalement que l'augmentation du volume du réacteur anaérobie augmente l'enlèvement du phosphore.

Il existe une liste impressionnante d'autres procédés ayant pour objectif l'enlèvement du phosphore, de l'azote et du carbone en continu. Ces procédés impliquent aussi la notion de recirculation des boues et de succession de bassins simulant des conditions anaérobies, anoxies et aérobies nécessaires à l'enlèvement des polluants.

Figure 2.2.1:
Le procédé à boues activées conventionel



Figrue 2.2.2:
Le réacteur Bardenpho

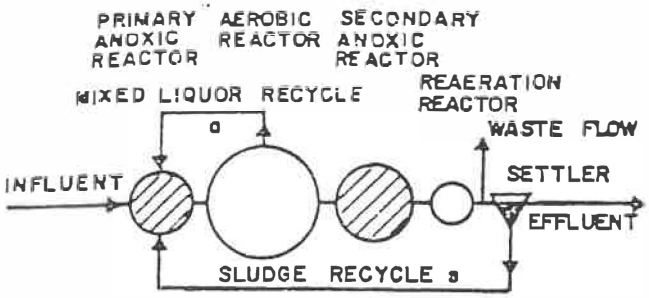


Figure 2.2.3:
Le réacteur Bardenpho modifié

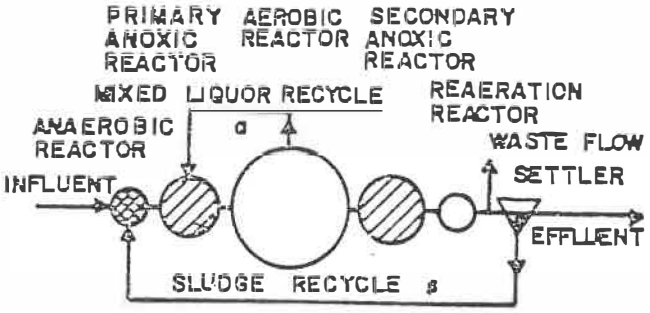
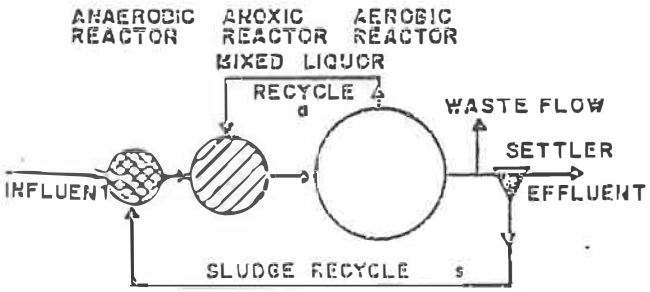


Figure 2.2.4:
Le réacteur Phoredox à trois stages



2.3 Réacteur biologique séquentiel (RBS)

Le réacteur biologique séquentiel (RBS) a été développé à l'universté Notre-Dame. Irvine et Bush (1979) définissent le RBS comme un réacteur de type cuvée dont l'opération est très similaire à celle d'un réacteur "fill and draw".

Le traitement par RBS consiste en un ou plusieurs réservoirs, chacun étant capable de traiter l'eau usée et d'en séparer les solides (biomasse). Le nombre de basssins dépend des variations et des pointes de débit à l'affluent et du degré de sophistication du système de contrôle. Chaque réacteur traite l'affluent selon une succession de 5 périodes complétant ainsi un cycle: remplissage, réaction, décantation, purge et repos. La figure 2.3.1 schématise un cycle d'opération typique d'un RBS.

Durant le remplissage, l'eau usée est alimentée au réacteur, le volume passe du niveau intial à son niveau maximum après un certain temps. Toutes les possibilités d'aération ou non et de mélange ou non sont permises. Les conditions de mélange et d'aération peuvent même être modifiées au cours du remplissage.

Durant la période de réaction, il n'y a pas d'affluent, le réacteur devient du type cuvée. L'aération est mise en marche selon les réactions désirées

(nitrification, dénitrification, captage ou relargage de phosphore). Cette partie sera détaillée plus loin. Lorsque la période de réaction est terminée, une partie du liquide mixte est retirée du réacteur afin de contrôler l'âge des boues à la valeur désirée.

Les apports d'énergie (air + mélange) sont ensuite coupés afin de permettre la décantation de la biomasse. L'eau clarifée est finalemnt purgée, le volume du liquide redevient à son niveau minimum.

La période de repos correspond au temps libre entre la fin de la purge et le début du remplissage suivant. La durée de cette période est variable, elle peut même être éliminée complétement.

Opéré de cette façon, le RBS est analogue aux réacteurs en continu dans lequel les événements se déroulent selon une certaine chronologie plutôt que dans une suite de réacteurs.

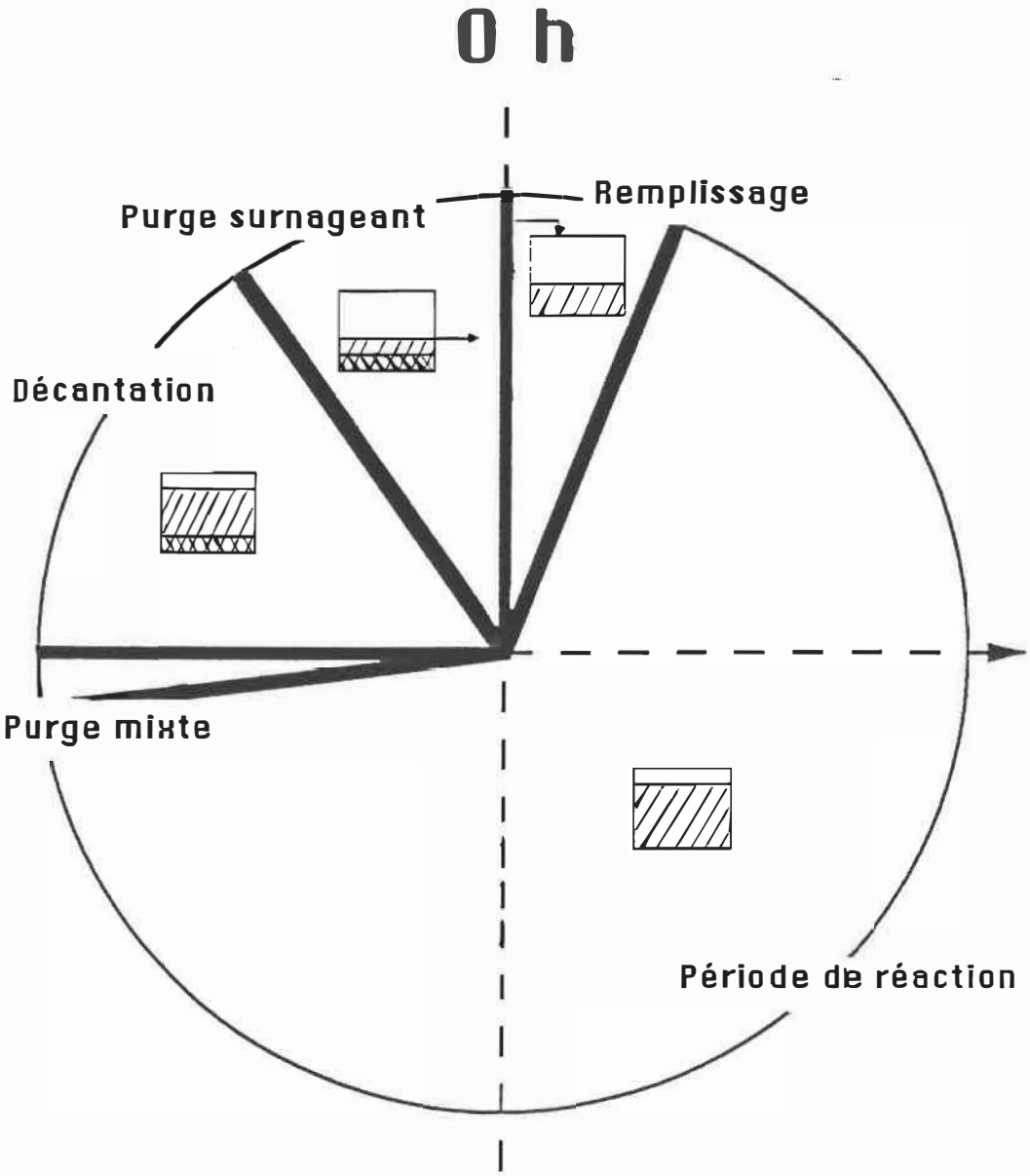


Figure 2.3.1: Diagramme d'opération typique d'un RBS

Le RBS comporte plusieurs avantages sur les procédés conventionnels (EPA, 1987):

1) il sert de bassin d'égalisation durant le remplissage, il peut donc tolérer les pointes de charge organique,
2) la vidange périodique de l'effluent permet d'ajuster la durée du cycle en fonction des critères de qualité,
3) le volume réactionnel peut être diminué lorsque le débit d'alimentation est plus faible,
4) les risques de "lavage" de la biomasse sont minimisés si la décantation de la biomasse est adéquate,
5) la croissance de bactéries filamenteuses se contrôle en variant les stratégies d'opération durant le remplissage,
6) le RBS a la possibilité de faire la nitrification, la dénitrification et l'enlèvement du phosphore par voie biologique dans le même bassin.

Par contre, le RBS a les inconvénients suivants:

1) Le système de contrôle des niveaux et des séquences est sophistiqué,
2) il est difficile de contrôler la phase de décantation pour minimiser les solides à l'effluent si la biomasse a des mauvaises propriétés de décantation.

2.4 Opération des RBS

Dans les réacteurs étudiés en laboratoire, les auteurs utilisaient de l'alimentation synthétique. Audic et al (1985) ont utilisé de l'eau usée brute qui était collectée à la sortie d'un dégrilleur grossier. L'eau était ensuite passée à travers un tamis de 0.5 mm puis envoyée au pilote.

2.4.1 Stratégies de remplissage

Selon Palis et Irvine (1985), une alternance de périodes aérées et non aérées durant le remplissage est préférable à une aération continue pour l'obtention d'effluent plus clair, l'enlèvement de l'azote et l'économie d'énergie.

Selon ces mêmes auteurs, la stratégie de remplissage a une influence directe sur la dénitrification. Ils ont étudié les effets d'un remplissage continu ou instantanné, aéré ou non et agité ou non. A la fin de la période de remplissage, les NOx et le substrat sont mesurés; les résultats se trouvent au tableau suivant.

Tableau 2.4.1: Stratégies de remplissage (Maning et al 1985)

Expérience:	1	2	3	4	5	6
remplissage:	continu	instantané	continu + instantané	instantané	continu	
	2 h	à la fin du rempl.	20 min pic à la fin	au début du remplissage	2 h	2 h
agitation	non	non	oui	oui	non 1h,oui 1h	oui
aération	oui	non	non	non	non	non
A la fin du remplissage:						
présence de NOx	oui	oui	non	non	non	non
disponibilité du substrat	oui	non	oui	oui en excès	oui en excès	oui en excès
dénitrification complète	non	non	complète	complète	complète	

affluent: 330 mg/L DCO, 44 mg/L TKN et 13 mg/L Ptot
opération: 17°C à 20°C, cycle total de 8 heures.

Les auteurs ont conclu que les stratégies ne favorisant pas la dénitrification durant le remplissage ne peuvent pas entraîner l'enlèvement du phosphore par voie biologique.

D'après les études de Manning et Irvine (1985), la biomasse qui reçoit du carbone durant le remplissage relargue le phosphore durant les 2 premières heures du cycle et atteint sa concentration maximale. Dans le cas où la biomasse ne voit pas de DCO, le relargage du phosphore se fait après 3 heures de non aération et continue durant 4 heures . (figure 2.4.1)

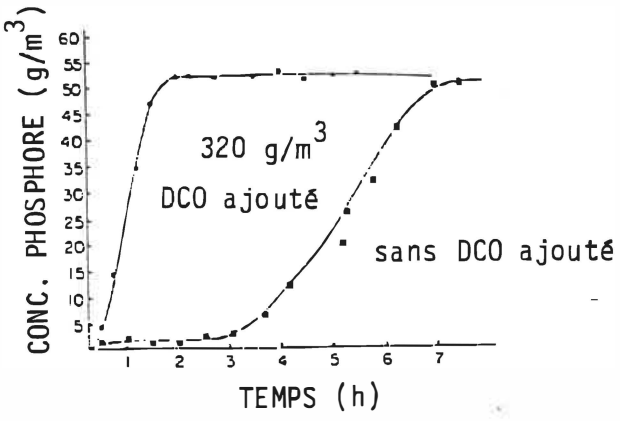


Figure 2.4.1: influence du carbone sur le relargage du phosphore (Maning et Irvine, 1985)

Le cycle 5 du tableau précédent a été repris par Okada et Sudo (1986), ils obtiennent des résultats similaires avec un affluent composé de glucose et de peptone (DBO = 200 mg/L, N_{tot} = 36 mg/L, P_{tot} = 6 mg/L). En effet ils ont remarqué que la dénitrification s'effectuait durant les trente premières minutes du remplissage qui se terminait en conditions anaérobies, permettant le relargage du phosphore.

Si les conditions durant le remplissage sont d'une heure sans air suivie d'une heure avec air, la période anaérobie est trop courte (moins de 30 min.) pour provoquer le relargage du phosphore (Okada et Sudo, 1986).

2.4.2 Périodes de réaction

La durée des périodes de réaction a une grande influence sur la qualité de l'effluent. Par exemple, si une période anaérobie de 1 ou 2 heures suit un remplissage anoxie/anaérobie de 2 heures, la biomase aura de mauvaises propriétés de décantation (Okada et Sudo, 1986).

L'ajout d'une deuxième période de réaction anoxie suivie d'une période aérobie dans le cycle n'augmente pas significativement la dénitrification. Okada et Sudo (1986) confirment toutefois que ces périodes ne nuisent pas à la qualité de l'effluent.

Doyle et Smith (1988) ont étudiée l'impact de la durée des périodes anaérobie et aérobie sur l'enlèvement du phosphore. Ils ont déterminé qu'une période anaérobie de 3.4 h suivie d'une période aérobie de 5.0 h sont préférables aux combinaisons suivantes: 0.8 h et 1.7 h, 0.8 h et 5.0 h ou 3.4 h et 1.7 h pour un âge des boues de 15 jours.

Durant la période aérobie, il est préférable de maintenir une concentration en OD entre 1.5 et 3.0 mg/L selon EPA (1987). Si la concentration en OD est trop faible, l'enlèvement du phosphore peut être réduit, la nitrification limitée et même favoriser le développement d'une biomase difficilement décantable. Si la

concentration en OD est trop élevée, le temps nécessaire pour atteindre la période anoxie sera plus grand. Il faudra alors augmenter le temps de non aération sous peine de diminuer les performances de dénitrification.

2.4.3 Décantation et purge du surnageant

Selon EPA (1986), il est nécessaire de prévoir 30 à 60 minutes pour la décantation de la biomasse. La durée de la purge du surnageant est fonction des équipements disponibles, elle est environ de 45 minutes.

2.4.4 Affluent faiblement chargé en carbone

Melcer et al (1987) ont étudié les performances d'un RBS lorsque celui-ci est alimenté avec une eau dont la concentration en carbone organique est faible (59 mg DBO_5/L). Comme l'alimentation et la période de réaction sont aérées et qu'il n'y a pas de période anoxie et anaérobie, il n'est pas possible de conclure que la déphosphatation provient d'une sur-accumulation du phosphore. L'enlèvement modeste du phosphore est probablement causé par l'utilisation du phosphore comme nutriment pour la synthèse des microorganismes.

En phase anaérobie, Comeau (1986) propose d'ajouter de l'acétate, ce qui a pour effet d'augmenter proportionnellement le relargage du phosphore ainsi que le taux de dénitrification.

CHAPITRE 3: MATERIELS ET METHODES

Toute l'expérimentation est réalisée sur le même montage expérimental. Elle se divise en trois étapes ayant chacune pour objectif l'étude d'une séquence d'opération du réacteur biologique séquentiel (RBS). Les trois séquences ne se différenciant que par la période de réaction, on propose une séquence modèle avant de détailler les périodes de réaction avec une description des paramètres étudiés et une description du montage expérimental choisi.

3.1 Eau usée à traiter

Avant de présenter les séquences, il est nécessaire d'avoir un aperçu du type d'eau qui sera traitée par le RBS. Afin de mieux simuler l'opération d'un RBS en municipalité, l'eau usée utilisée est celle d'un effluent municipal. Sa concentration en matière organique est donc faible.

L'approvisionnement se fait deux fois par semaine, ce qui permet à l'eau de conserver ses qualités. L'eau est prise à la sortie du dégrilleur à l'usine d'épuration de la ville de Deux-Montagnes. Elle est ensuite tamisée (tamis de 100 mesh), puis conservée au réfrigérateur. Dans

certains cas où l'approvisionnement ne pouvait se faire, l'eau a été conservée au congélateur.

3.2 Description d'une séquence modèle

Le cycle d'opération du RBS est composé d'une série de phases bien définies qui se succèdent de manière séquentiel et en continu. La figure 3.2.1 montre les séquences utilisées pour ce travail.

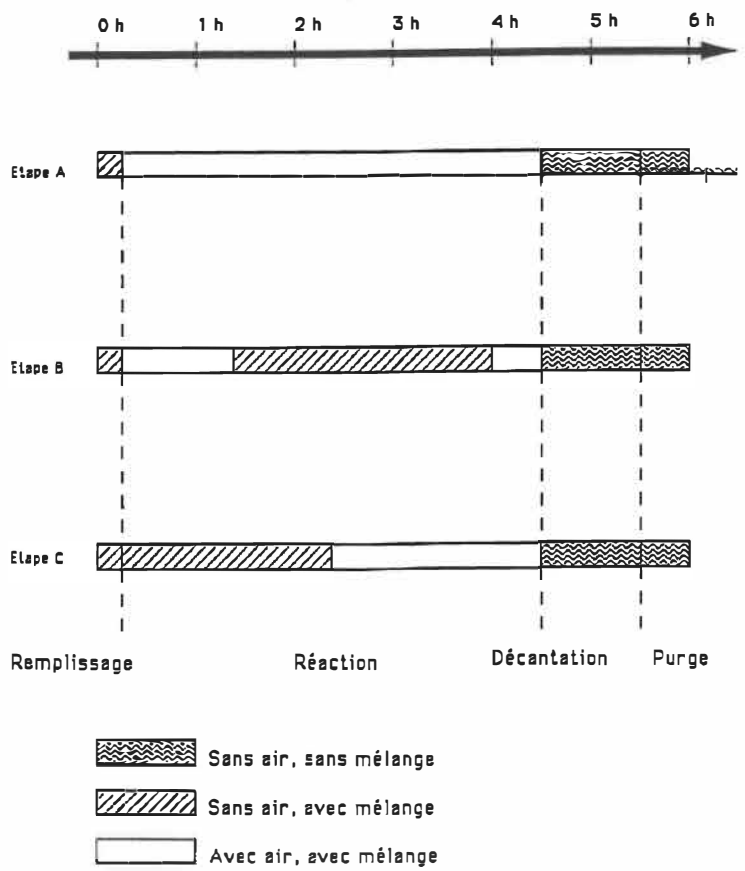


Figure 3.2.1: Séquences étudiées

A la fin d'un cycle le réacteur contient la moitié de son volume de liquide mixte (biomasse + eau traitée). Lors du remplissage le volume est complété avec l'eau usée municipale. Du fait de la faible concentration en carbone, il est préférable d'éviter les effets de dilution. Cette approche innovatrice du sélecteur se traduit en pratique comme suit: l'eau usée est accumulée dans un bassin de rétention et lorsque le réacteur est au début d'un nouveau cycle, cette eau est déversée très rapidement dans le RBS, soit en 15 minutes. Les microorganismes sont en présence d'un substrat moins dilué, donc plus accessible si on compare à un substrat alimenté sur une plus longue période. Durant le remplissage, le liquide est agité mais non aéré, ce qui induit un début de dénitrification.

Comme son nom l'indique, la période de réaction a pour but d'achever les réactions biologiques menant à l'enlèvement des polluants. Par analogie à un réacteur conventionnel, il est nécessaire d'utiliser un temps de résidence hydraulique de 4 à 8 heures (Metcalf et Eddy, 1972). Le milieu réactionnel est continuellement mélangé durant cette période, l'aération variant selon les objectifs visés: nitrification, dénitrification...

La période de réaction se termine par une purge de liquide mixte (biomasse + eau). Cette purge permet un contrôle de l'âge des boues compris entre 15 et 20 jours;

elle doit être très courte (2 minutes), le volume à retirer à chaque cycle (100 à 150 ml) étant très faible.

Une période de 60 minutes est nécessaire à la décantation de la biomasse, avant une phase de retrait du surnageant durant 30 minutes. Ces 2 phases sont non aérées et non agitées.

Le cycle a une durée totale de 6 heures, ce qui permet d'effectuer 4 cycles dans une journée pour un même RBS.

3.3 Séquences étudiées (périodes de réaction)

3.3.1 Etape A

L'étape A est composée d'une période de réaction complètement aérée et mélangée. Elle a pour objectif de montrer que l'alimentation du RBS basée sur une approche "sélecteur" permet l'enlèvement de la matière organique et l'obtention d'un effluent traité libre en matières en suspension.

3.3.2 Etape B

La période de réaction de l'étape B se divise en trois parties: une phase aérée favorisant la nitrification, une phase non aérée nécessaire à la dénitrification, puis finalement une période aérée permettant d'éliminer l'azote gazeux qui pourrait nuire à la décantation. Cette étape vise la caractérisation du pouvoir nitrifiant et dénitrifiant du RBS. L'hypothèse d'une déphosphatation par sur-accumulation durant la période finale d'aération sera vérifiée.

3.3.3 Etape C

L'étape C a pour but de vérifier à partir de certaines hypothèses touchant le traitement des données, si l'enlèvement du phosphore implique un stockage biologique. La période de réaction débute par une phase non aérée afin d'utiliser le carbone disponible pour la dénitrification puis pour le stockage de PHA qui provoque le relargage de phosphates dans le milieu. La phase aérée qui suit favorise le captage du phosphore ainsi que la nitrification.

Les conditions d'opération de chacune des étapes sont résumées au tableau suivant.

Tableau 3.3.1: Périodes de réaction des étapes A, B, C

	Période de réaction	Durée
Etape A	phase aérée	255 min
Etape B	phase aérée phase non aérée phase aérée	70 min 155 min 30 min
Etape C	phase non aérée phase aérée	130 min 125 min

3.4 Paramètres étudiés

Pour chaque étape, deux types d'études sont effectuées. Tout d'abord une caractérisation globale des courants d'entrée et de sortie du RBS. Une étude plus approfondie est faite sur l'évolution des polluants dans le réacteur en considérant un cycle particulier.

3.4.1 Caractérisation globale sur les courants

L'étude des concentrations des divers polluants dans les courants d'entrée et de sortie du RBS vise à déterminer l'établissement du régime de pseudo-équilibre. On entend par pseudo-équilibre, l'atteinte d'une certaine répétitivité au niveau de l'enlèvement des polluants d'un

cycle à l'autre. Certaines caractéristiques de la biomasse sont aussi mesurées.

Les variables étudiées sont énumérés au tableau 3.4.1, une brève description de chaque test est faite à l'annexe 1. Les tests effectués sont en accord avec les procédures détaillées dans "Standard Methods".

Les échantillons sont prélevés dans le courant d'entrée du RBS et dans le courant de purge du surnageant pour les mesures des polluants à l'entrée et à la sortie du réacteur. L'échantillon pris pour déterminer les caractéristiques de la biomasse vient de la purge de liquide mixte.

3.4.2 Comportement des polluants au cours d'un cycle

Une deuxième approche consiste à isoler un cycle et à considérer le RBS comme un réacteur de type cuvée. Cette étude vise à caractériser l'évolution des divers polluants en fonction du temps et de leur environnement.

Des échantillons de 60 à 120 ml de liquide mixte sont prélevé durant le remplissage, durant la période de réaction et à la fin de la purge du surnageant. Ces échantillons sont filtrés, des tests de P-PO4, de N-NH4 et de N-NO3 sont effectués sur le filtrat. Les SES, SVS et

phosphore dans la biomasse sont aussi analysés sur quelques échantillons.

Durant le cycle, l'acquisition des données s'effectue en continu, recueillant ainsi les valeurs de température, de pH, de potentiel rédox et d'oxygène dissous dans le réacteur.

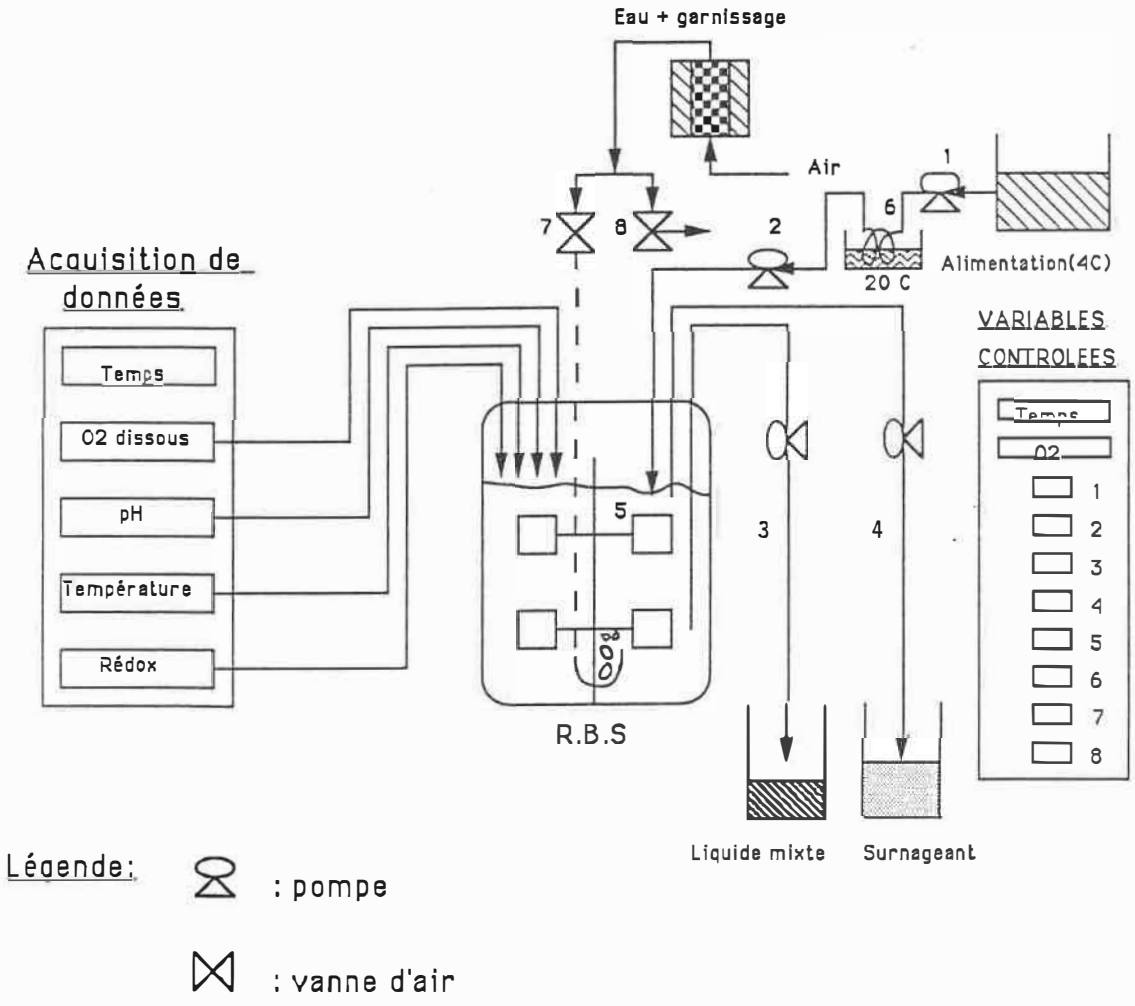
Tableau 3.4.1: Varaibles étudiées

Courants entrée (liq. mixte) sortie (surnageant)	Carbone: DCOt, DCOs, DBO Azote: $N-NH_4$, $N-NO_3$, NTK Phosphore: $P-PO_4$, Ptot
Biomasse (liq. mixte)	Quantité: SES et SVS Décantation: IVB Contenu en phosphore: Ptot
Cycle isolé (filtrat + liq. mixte)	Carbone: DCO Azote: $N-NH_4$, $N-NO_3$ Phosphore: $P-PO_4$ Biomasse: SES, Ptot
Acquisition de données	pH, température, rédox, oxygène dissous

3.5 Description du montage expérimental

La figure 3.5.1 représente le montage expérimental utilisé pour ce travail. Les chiffres entre parenthèses dans le texte sont identiques à ceux du schéma.

Figure 3.5.1: Montage expérimental



Légende: : pompe

: vanne d'air

3.5.1 Le RBS et ses périphériques

Le réacteur biologique séquentiel est un bassin dans lequel une série d'opérations se produisent. Un fermenteur de 20 L, (15 L utile) permettant un contrôle de la température à 20 ± 1°C, et muni d'un système d'agitation composé de 2 séries de 6 pales Rushton et de chicanes a été utilisé.

L'aération est contrôlée par 2 vannes de type solénoïde à action contraire. L'air passant à travers la vanne (7) normalement ouverte est orienté vers le RBS et la vanne (8) dirigée vers l'extérieur est normalement fermée. En période non aérée, l'air est dirigé vers l'extérieur tandis que la vanne du RBS est fermée. Ce système à trois voies permet d'éviter d'aérer le RBS , en période non aérée, en cas de fuite de la vanne (7).

L'alimentation, conservée à 4°C, est pompée 30 min. avant le début du cycle dans un bassin tampon avec agitation afin de l'amener à une température à 20°C à l'aide d'un échangeur de chaleur relié à un bain thermostaté. Ce réservoir sert aussi à contrôler, par un trop plein, le volume d'eau qui sera envoyé au RBS.

Le remplissage s'effectue avec la pompe (2), de type péristaltique (masterflex) comme les 3 autres pompes utilisées sur le montage.

La pompe (3) est dédiée à la purge du liquide mixte. Comme il n'y a pas d'autre contrôle, son débit doit être continuellement vérifié.

Le surnageant est retiré après décantation avec la pompe (4). Une tige enfoncée dans le liquide à une hauteur prédéterminée maintient un volume de 7.5 L dans le RBS en fin de purge.

3.5.2 Le logiciel de contrôle et d'acquisition de données

Afin de mener à bon terme les différents cycles de chacune des étapes, il est important de concevoir un système autonome au niveau de l'opération de base, décrite précédemment. De plus, l'utilisation d'un système automatisé, permet aisément l'ajout d'un système d'acquisition de données.

Le logiciel de contrôle et d'acquisition mis au point interagit par une carte-interface reliée aux périphériques de contrôle (tels les pompes, moteurs, vannes d'air) et aux périphériques d'acquisition de données (telles les sondes à température, à pH, à potentiel rédox et à oxygène dissous).

Le logiciel est bâti selon l'organigramme simplifié représenté à la figure 3.5.2. A l'annexe 2 se trouve une

copie du programme de contrôle et d'acquisition de données utilisé lors de l'étape B.

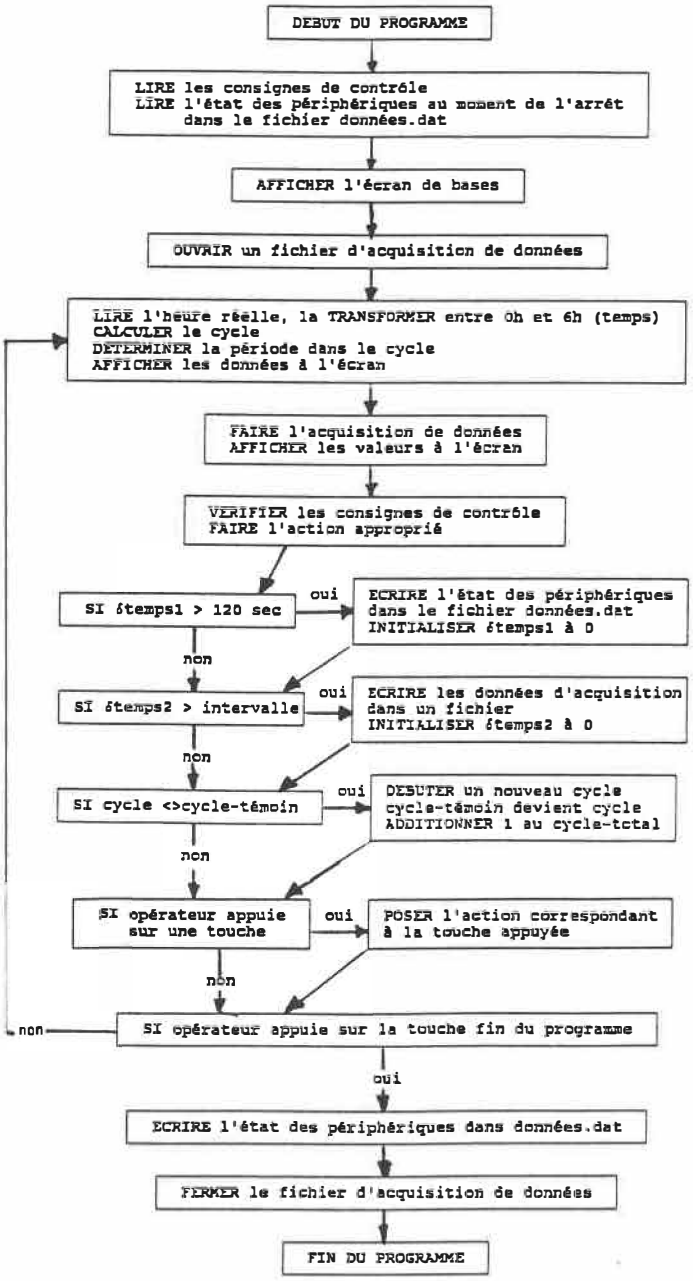
Le critère décisionnel de contrôle peut être basé sur le temps, c'est-à-dire que les périphériques sont actionnés selon la séquence temporelle programmée. Toutefois, la concentration en oxygène dissous peut être un paramètre de contrôle de la vanne d'aération. L'utilisateur peut également activer ou arrêter un ou plusieurs périphériques. Toutes les opérations étant commandées depuis le clavier aucune connaissance particulière en programmation n'est nécessaire pour opérer le réacteur.

Le redémarrage automatique du système de contrôle, après une panne électrique, est aussi prévu. Dans ce cas, l'ordinateur prend en note à quel moment s'est produit la panne, sa durée et le cycle en cours.

L'acquisition de données sur fichier se fait par transfert d'un signal analogique de la sonde au logiciel. Ce dernier le transforme en données par une courbe de calibration préalablement réalisée par les utilisateurs. Les données d'acquisition sont continuellement mises à jour à l'écran. Elles sont enregistrées sur fichier à un intervalle de temps régulier qui peut être redéfini à tout moment.

Le logiciel a été testé sur le RBS et ses périphériques dans un premier temps (étape préliminaire de conception, développement et démarrage d'une durée de 3 mois) avec de l'eau propre et sans biomasse. Les séquences des 3 étapes ont été éprouvées; le logiciel a alors subi quelques modifications mineures. Des essais préliminaires ont ensuite été effectués avec les eaux usées de la ville de Deux-Montagnes.

Figure 3.5.2: Organigramme simplifié du logiciel de contrôle et d'acquisition de données



CHAPITRE 4: RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Etude des courants entrée et sortie

Pour l'étude des courants d'entrée et de sortie, le RBS est considéré globalement tel un procédé en continu. La figure 4.1.1 schématise le procédé.

Les données d'échantillonnage recueillies pour les trois modes d'opération du RBS ou étapes sont compilées sur les graphique 4.1.2 à 4.1.5. Les valeurs expérimentales pertinentes sont regroupées en tableaux à l'annexe 3.

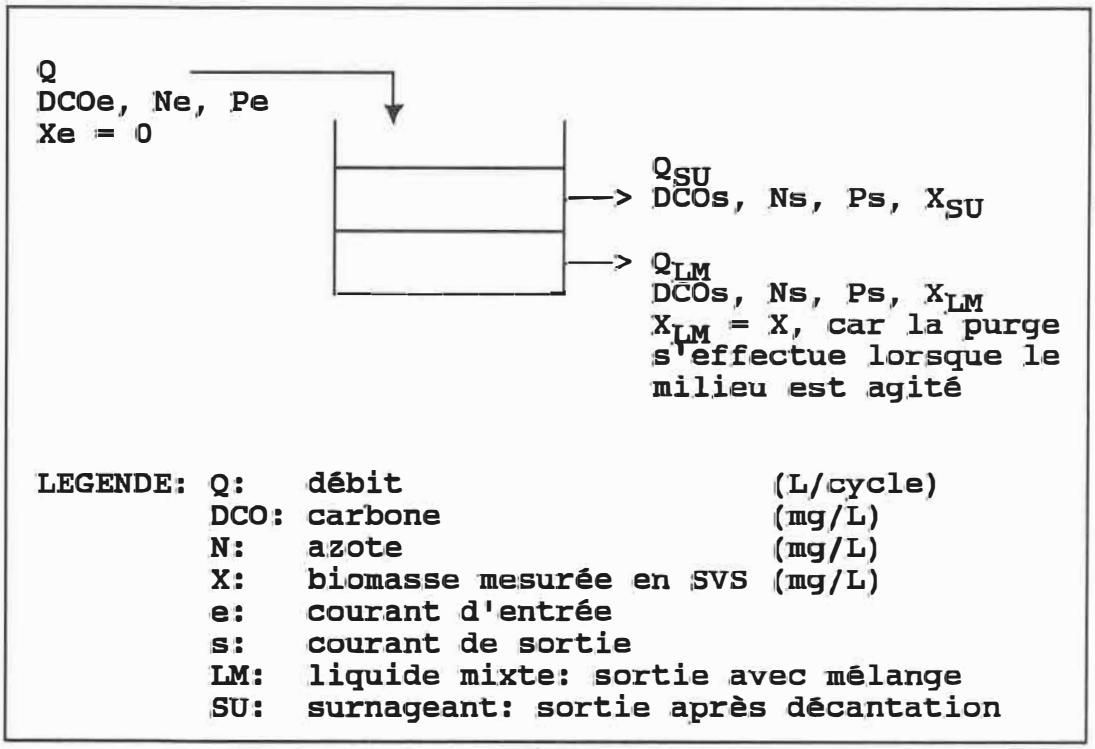
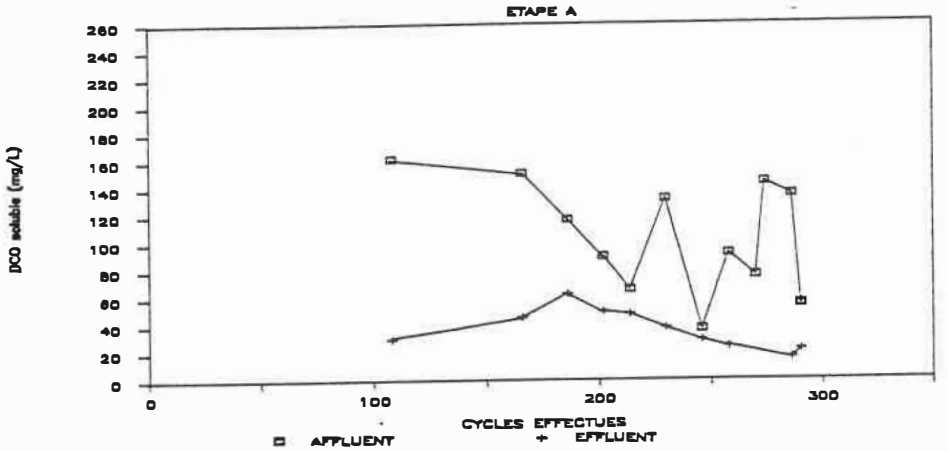
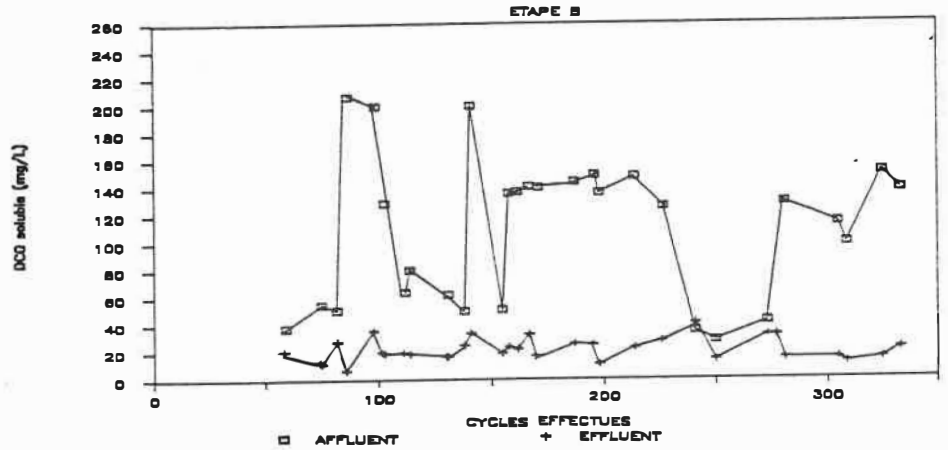


Figure 4.1.1: Les courants d'entrée et de sortie du RBS

Figure 4.1.2: Evolution de la DCO avec le nombre de cycles





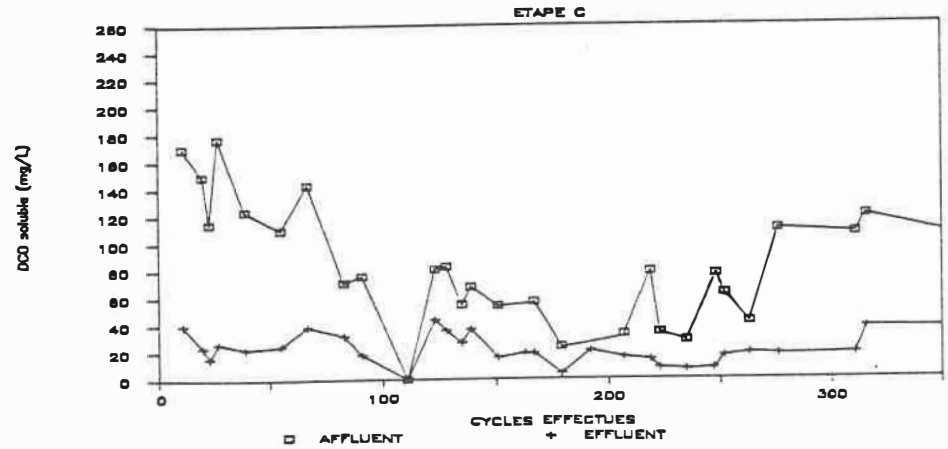


Figure 4.1.3: Evolution de la biomasse avec le nombre de cycles

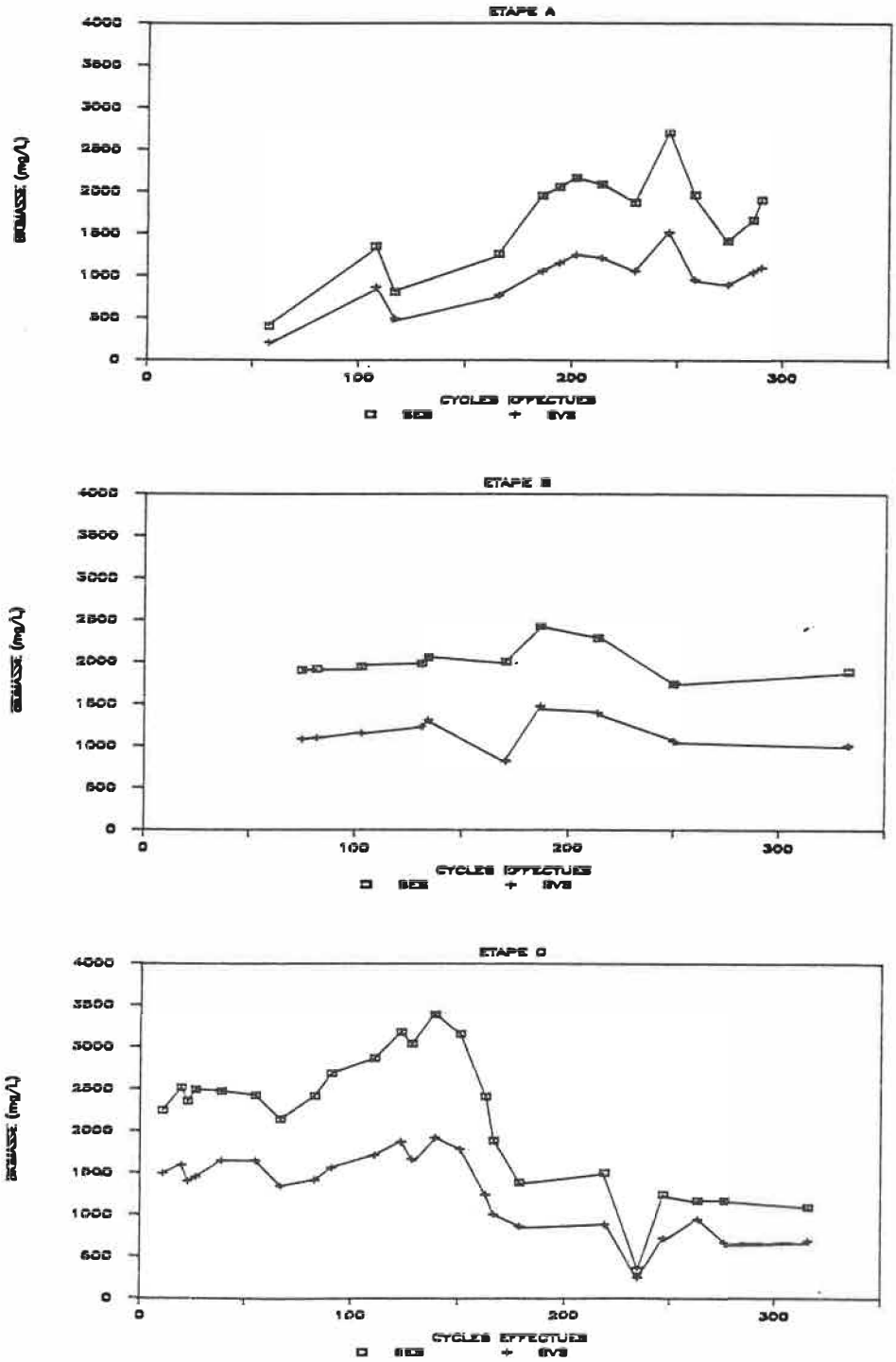


Figure 4.1.4a: Evolution de l'azote avec le nombre de cycles de l'étape A

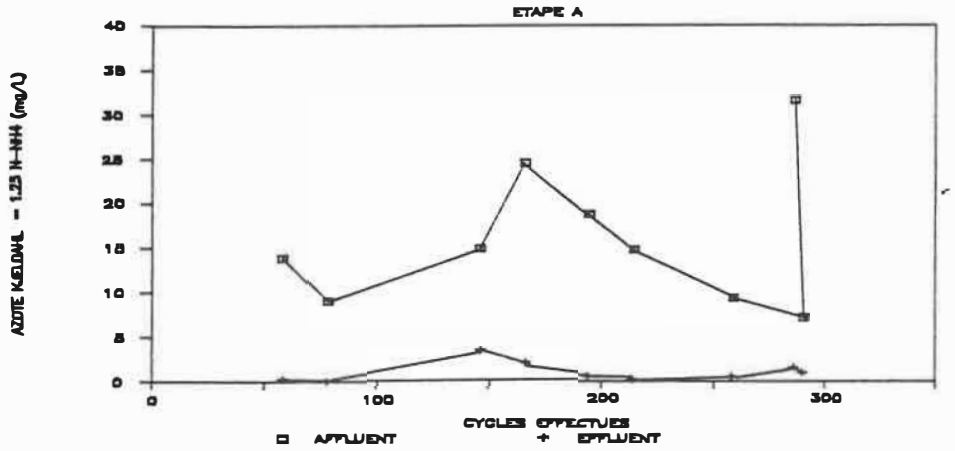
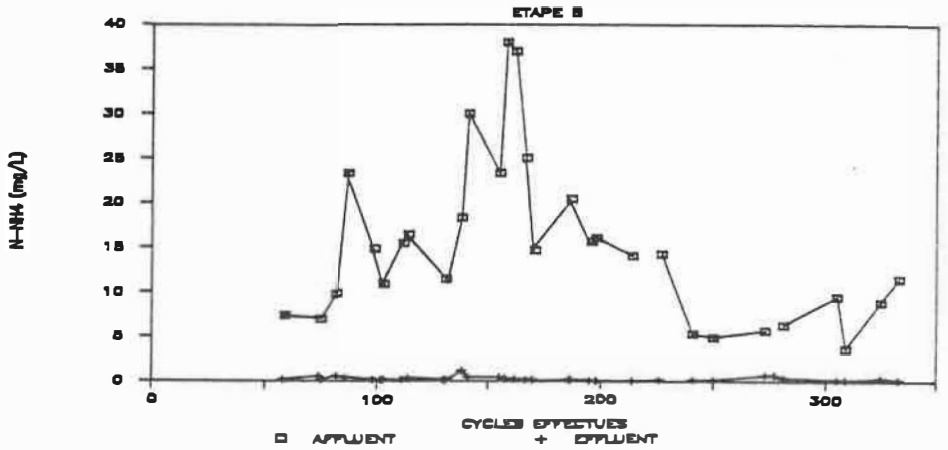


Figure 4.1.4b: Evolution de l'azote avec le nombre de cycles de l'étape B



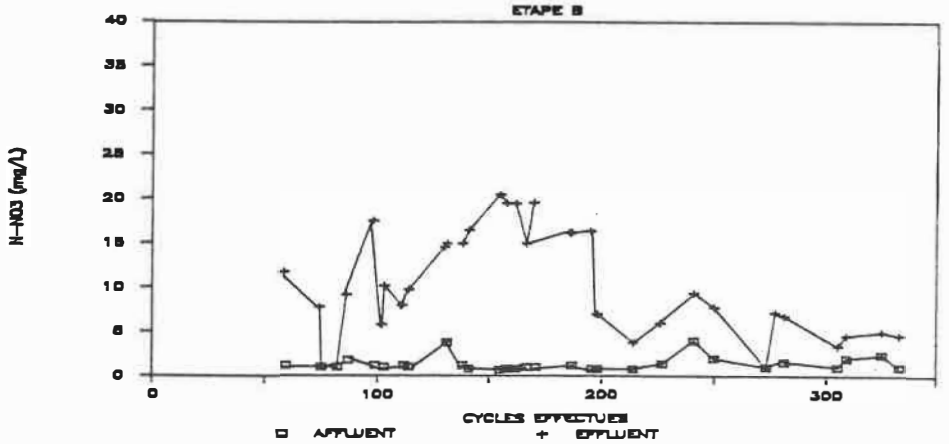
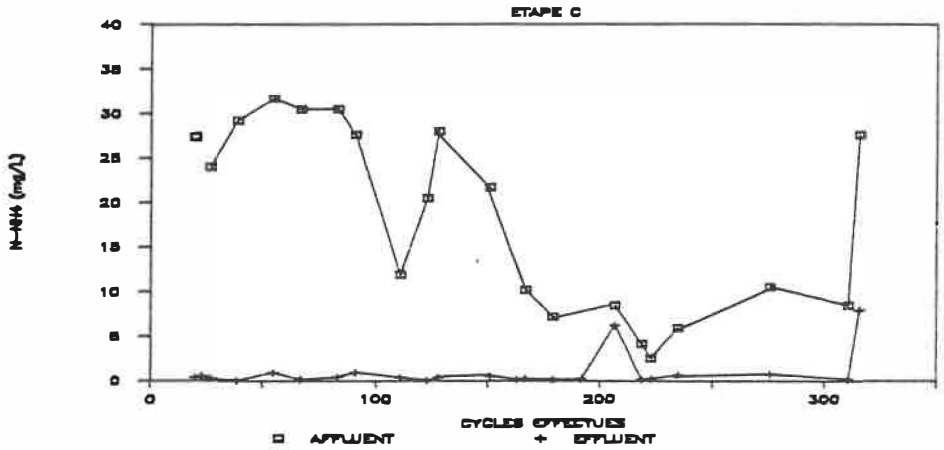


Figure 4.1.4c: Evolution de l'azote avec le nombre de cycles de l'étape C



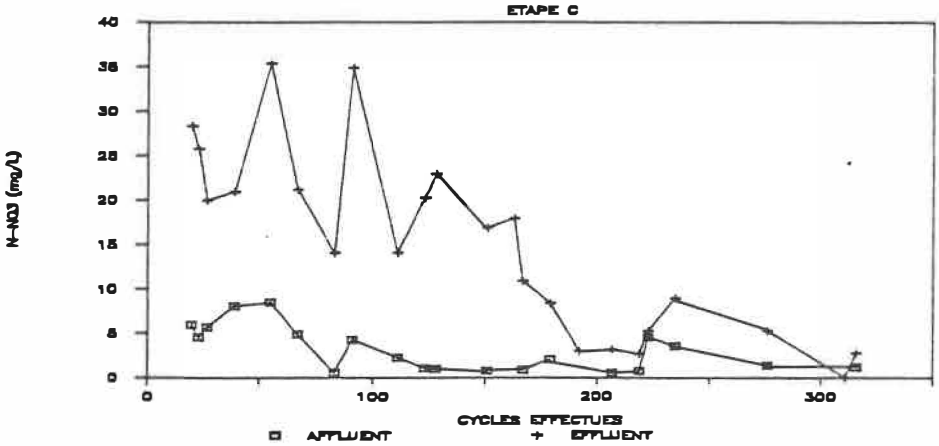
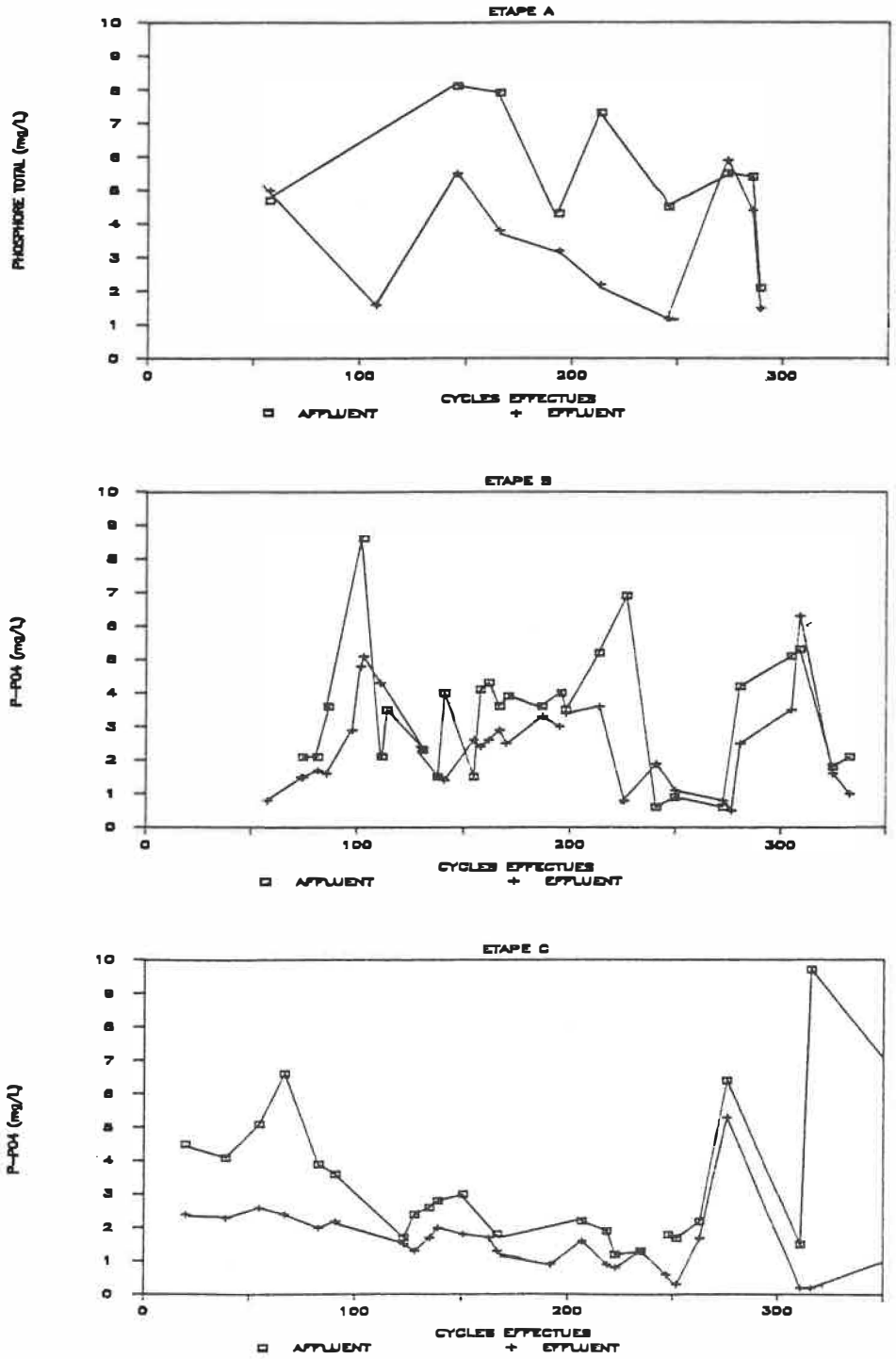


Figure 4.1.5: Evolution du phosphore avec le nombre de cycles



4.1.1 Enlèvement du carbone

Malgré une certaine variation des concentrations de DCO soluble à l'entrée, figure 4.1.2, la sortie est relativement stable à 25 ± 15 mg/L. Les variations à l'affluent s'expliquent facilement puisque l'eau usée à traiter vient directement de l'usine d'épuration.

Les mesures de la demande biologique en oxygène (annexe 3) sur l'effluent montre que celui-ci est très peu biodégradable, avec une DBO de 7 ± 5 mg/L. L'efficacité d'enlèvement du carbone est donc maximale.

4.1.2 Caractéristiques de la biomasse

D'après les graphiques de la figure 4.1.3, la biomasse subit une certaine évolution qui est en relation directe avec la concentration en carbone à l'entrée. En effet, au cours de l'étape C, au cycle 85, il y a eu une diminution de la concentration en DCO à l'entrée et par la suite, la quantité de biomasse a chuté dans le réacteur. Le mode d'opération du RBS ne semble pas affecter la biomasse.

Les mesures régulières de l'indice du volume des boues (IVB) indiquent que le pouvoir de décantation de la biomasse est très bon en moyenne 175 ml/gSES. D'après

Maning et Irvine (1985), le RBS pourrait supporter des valeurs d'IVB aussi hautes que 300 ml/g.

La mesure de l'IVB est en fait liée directement à la dimension du réacteur, par ailleurs les données mesurées peuvent se comparer entre elles, mais il est difficile de faire des corrélations avec d'autres auteurs. De plus, on a remarqué que la décantation est 2 fois plus rapide dans le RBS que dans le cylindre servant à faire la mesure. Toutefois, le suivi de l'IVB sur des échantillons donne une bonne indication de la qualité du surnageant.

L'âge des boues ou le temps de résidence des cellules (TRC) est calculé à partir de l'équation:

$$TRC = \frac{V * X}{Q_{LM} * X + Q_{SU} * X_{SU}} \qquad (4.1)$$

où: TRC: temps de résidence des cellules
V : volume utile du RBS (15L)

L'âge des boues a varié au cours des étapes parce qu'il est fortement influencé par la concentration en SVS (X_{SU}) dans le surnageant, il aurait fallu modifié en conséquence le débit de purge de liquide mixte. Cette mesure corrective a été effectuée à quelques reprises mais dans le cas d'un réacteur de faible volume, il est très difficile de contrôler avec précision ce paramètre. L'objectif de maintenir un âge de boues compris entre 15 et 20 jours (annexe 3) a été relativement bien atteint.

Un examen approfondi au microscope a montré les différents types de microrganismes présents dans le réacteur. Les bactéries filamenteuses sont présentes en très faible quantité. Ceci s'explique par le mode de remplissage anoxie, qui n'est pas favorable au développement de bactéries filamenteuses. Leur présence peut aussi se détecter par un IVB élevé indicateur d'une mauvaise décantation de la biomasse.

Comme dans tous les systèmes d'épuration des eaux usées, on a remarqué des protozoaires (ciliés holotriches, ciliés pertriches, ciliés hopytriches et rizofragellés) et des métazoaires (rotifères, nématodes et annelides).

De plus des ciliés *Suctoria* ont été observés. Selon Blanchard (1990), ce microrganisme ne se reproduit que dans des réacteurs biologiques alimentés par des eaux usées municipales. Quelques photos prises au microscope se trouvent à l'annexe 4.

4.1.3 Enlèvement de l'azote

Selon les figures 4.1.4, les trois séquences favorisent la nitrification: plus de 95% de l'azote entrant dans le réacteur sous forme ammoniacale est éliminé.

Comme les tests mesurent l'azote sous forme ammoniacale ou sous forme oxydée, la formation de nitrates est directement reliée à la nitrification, c'est-à-dire qu'un $N\text{-}NO_3$ est formé à chaque $N\text{-}NH_4$ nitrifié.

L'azote étant utilisé pour la synthèse de nouvelle biomasse durant un cycle, celle-ci peut être estimée par la quantité de biomasse qui est éliminé du réacteur à chaque cycle:

$$Rx = \frac{X}{TRC * 4} \qquad (4.2)$$

où Rx : production de biomasse par cycle (mg/L cycle)
X : concentration de biomasse (mg/L)
TRC: temps de résidence des cellules (jours)
4 : nombre de cycles par jour

Les nitrates formés peuvent aussi être dénitrifiés durant les phases anoxies des étapes B et C. Il est possible d'estimer le taux de dénitrification durant un cycle en faisant un bilan sur l'azote en considérant un mélange parfait:

$$\frac{VdN}{d(cycle)} = Q * Ne - Q * Ns - V * Y_{N/X} * Rx - V * q_d \qquad (4.3)$$

où dN/d(cycle): terme d'accumulation d'azote durant un cycle
Ne : $(N\text{-}NO_3 + N\text{-}NH_4)$ à l'entrée
Ns : $(N\text{-}NO_3 + N\text{-}NH_4)$ à la sortie
$Y_{N/X}$: Rapport azote/biomasse = 0.122 mg/mg (Mc Carty, 1970)
q_d : taux de dénitrification (mg $N\text{-}NO_3$/L/cycle)

En utilisant l'équation 4.3 et en posant comme hypothèse que le RBS est en régime pseudo-équilibre d'un cycle à l'autre, le terme dNs/d(cycle) est nul, car l'azote est soit transformé de $N\text{-}NH_4$ en $N\text{-}NO_3$ (nitrification), soit de $N\text{-}NO_3$ en N_2 (dénitrification), mais ne s'accumule pas dans le réacteur. Le taux de dénitrification peut alors être évalué de façon analytique par l'équation 4.4 suivante:

$$q_d = \frac{Q}{V}(Ne-Ns) - Y_{N/X} * Rx \qquad (4.4)$$

Durant les étapes B et C, une période de réaction anoxie peut induire la dénitrification. En appliquant l'équation (4.3a), on trouve (figures 4.1.6a et 4.1.6b) que la dénitrification se fait très rarement au cours de ces deux étapes. De plus on constate des concentrations en nitrates très grandes à la sortie du réacteur (figures 4.1.4b et 4.1.4c). Comme il le sera expliqué ultérieurement, la disponibilité du carbone dans le milieu réactionnel est limitante à la dénitrification.

L'étape C offre un plus grand potentiel de dénitrification puisque la période anoxie suit le remplissage, maintenant un niveau de carbone suffisant pour cette opération. En ce qui concerne l'étape B, le carbone semble être consommé durant la première période aérobie et serait absent durant la phase anoxie.

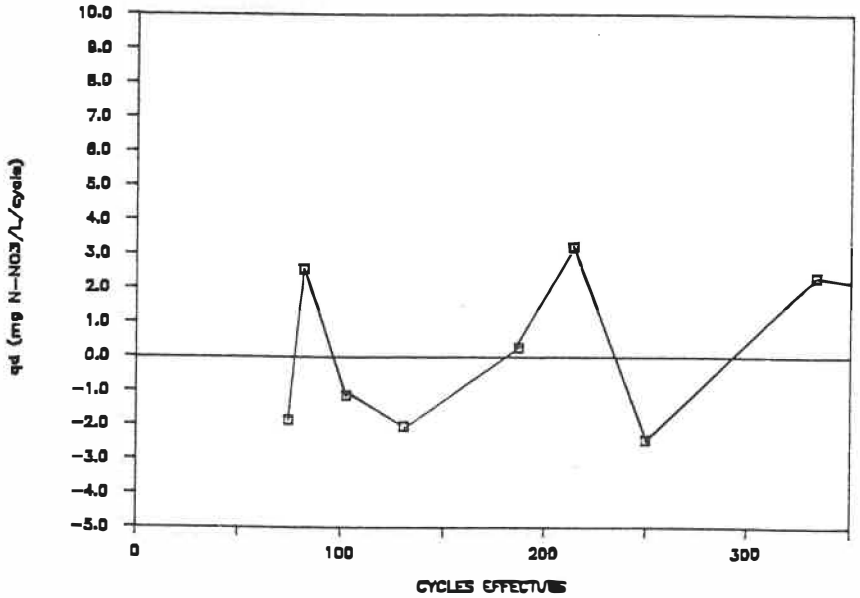


Figure 4.1.6a: Evolution des taux spécifiques de dénitrification (q_D) avec le nombre de cycles, étape B

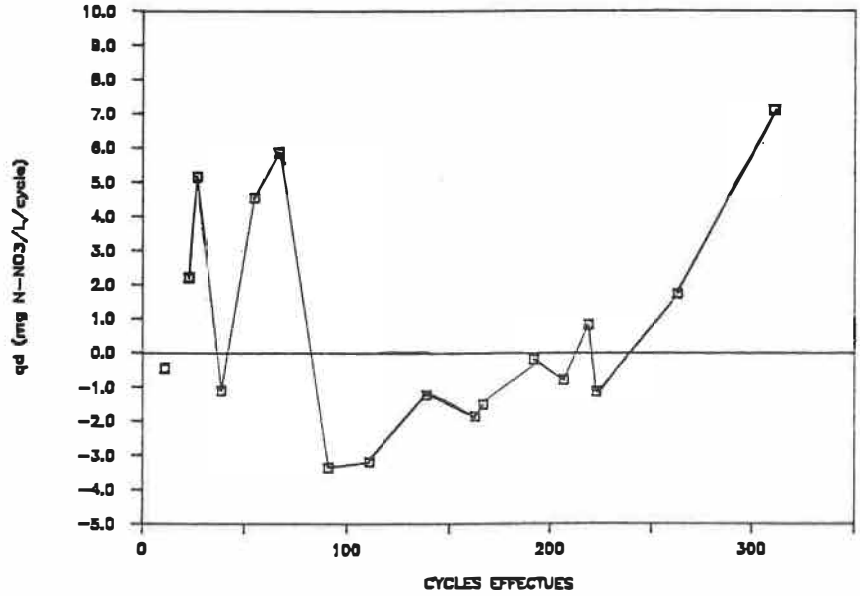


Figure 4.1.6b: Evolution des taux spécifiques de dénitrification (q_D) avec le nombre de cycles, étape C

4.1.4 Enlèvement du phosphore

D'après les graphiques de la figure 4.1.5, le phosphore ($P-PO_4$) à la sortie du réacteur atteint des concentrations variant de 1 à 5 mg/L. Comme il l'a déjà été mentionné, il est nécessaire d'avoir une période anaérobie (sans oxygène, sans nitrates) pour favoriser l'enlèvement du phosphore par sur-accumulation biologique, cette condition peut être retrouvée à l'étape C. Il est possible d'estimer par un bilan s'il y a sur-accumulation de phosphore dans la biomasse.

$$\frac{VdP}{d(cycle)} = Q * Pe - Q * Ps - V * Y_{P/X} * Rx \qquad (4.5)$$

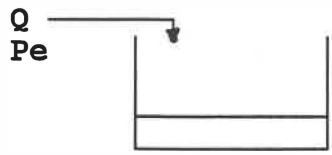
où Pe : phosphore à l'entrée
Ps : phosphore à la sortie
$Y_{P/X}$: Rapport phosphore/biomasse = 0.023 mg/mg (Mc Carty, 1970)

Contrairement au bilan effectué sur l'azote, le terme d'accumulation du phosphore dans le réacteur ne peut être négligé. En effet, le terme d'accumulation représente directement le phosphore accumulé dans la biomasse durant un cycle. Ce terme peut donc se répercuter sur les cycles suivants.

Une deuxième approche de calcul est proposée. On cherche la concentration en phosphore à la sortie du réacteur prenant comme hypothèse qu'il n'y a pas déphosphatation par sur-accumulation. On fait alors un

bilan sur le phosphore durant le remplissage, la période de réaction et la purge.

a) Bilan sur le phosphore durant le remplissage:



$$dV/dt = Q$$
$$V = V_0 + Qt$$

$$dVP/dt = Q * Pe$$

En intégrant les équations,
début du remplissage: $t = t_0$; $P = P_0$; $V = V_0$
fin du remplissage: $t = t_1$; $P = P_1$; $V = Vtotal$

$$P_1 = Pe - (Pe-P_0) * \frac{(V_0 + Qt_0)}{(V_0 + Qt_1)} \qquad (4.6)$$

b) Bilan sur le phosphore durant la période de réaction:

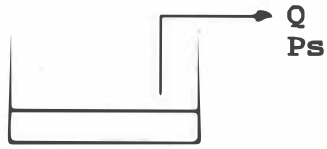
$$dV/dt = 0$$

$$\frac{VdP}{dt} = V * Y_{P/X} * Rx$$

début de période: $t = t_1$; $P = P_1$; $V = Vtotal$
fin de période: $t = t_2$; $P = P_2$; $V = Vtotal$

$$P_2 = P_1 - Y_{P/X} * Rx * (t_2 - t_1) \qquad (4.7)$$

c) Bilan sur le phosphore durant la purge:



$$dV/dt = -Q$$

$$dVP/dt = -Q * Ps$$

$$Ps = P_2$$

en remplaçant P_1 de 4.7 par l'équation 4.6,
et sachant que $(V_0 + Qt_0) = V_0$ car $t_0 = 0$
$(V_0 + Qt_1) = Vtotal$
$Vtotal = 2*V_0$
on obtient:

$$P_2 = Ps = \frac{Pe + P_0}{2} - Y_{P/X} * Rx\ (t_2 - t_1) \quad (4.8)$$

P_0 correspond à Ps du cycle précédent

Une simulation a été effectuée sur les données de l'étape C. Les données manquantes sur la concentration en phosphore à l'entrée ont été supposées égales aux données obtenues lors des cycles précédents. Cette approximation est acceptable dans la mesure où l'eau fraîche une fois bien caractérisée était gardée au réfrigérateur jusqu'au nouvel arrivage d'eau. Les valeurs de concentration en biomasse et de temps de résidence cellulaire ont été interpolées à partir de données connues.

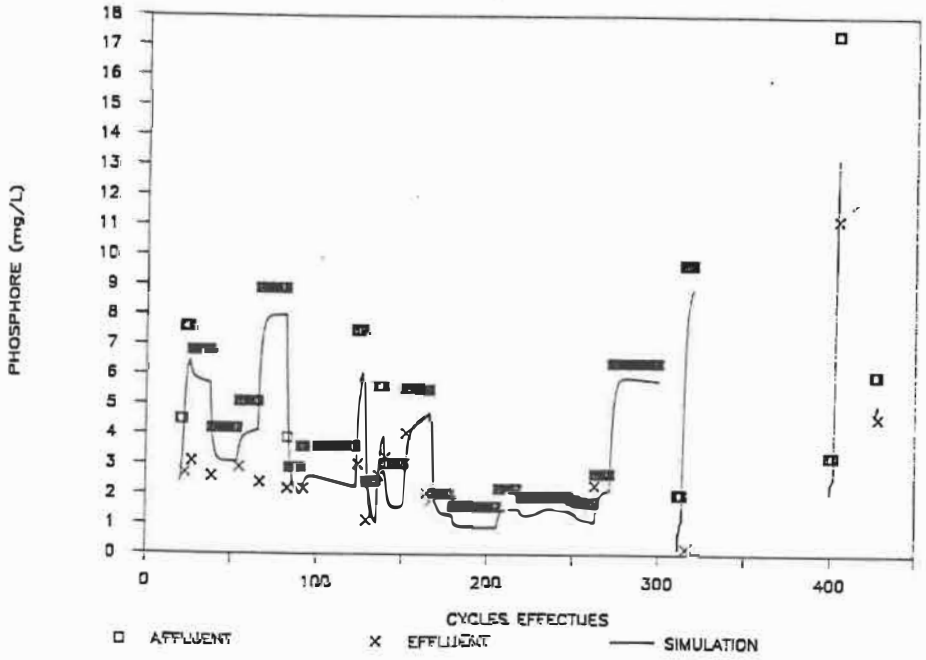
Les figures 4.1.6a et 4.1.6b montrent les résultats d'estimation du phosphore à la sortie du réacteur en considérant qu'il n'y a pas eu d'accumulation dans la biomasse. Les premières données expérimentales, celles du cycle 20, servent de point de départ à la simulation.

Lorsque les valeurs expérimentales de phosphore à la sortie sont inférieures aux valeurs déterminées par la simulation, on peut considérer qu'il y a eu déphosphatation par sur-accumulation. Lorsque les valeurs sont du même ordre de grandeur, il y a seulement eu consommation de phosphore pour la synthèse biologique.

Cette simulation réflète bien les points expérimentaux pour les 300 premiers cycles, en conséquence, il n'y a pas eu de déphosphatation par sur-accumulation dans la biomasse.

Cette simulation permet aussi de visualiser les cycles ayant permis une accumulation de phosphore. Ces données sont confirmées par l'étude cinétique au cours de certains cycles isolés. Par exemple, pour le cycle 316, la simulation estime une accumulation de phosphore de 3.6 mg/L, cette valeur est aussi déterminée durant la caractérisation de ce cycle. Les cycles 276 et 428 ont aussi permis une légère sur-accumulation du phosphore.

Figure 4.1.7: Simulation du phosphore à la sortie du RBS considérant qu'il n'y a pas de déphosphatation par voie biologique, étape C



4.1.5 Enlèvement des solides en suspension

Pour l'étape A, il y avait beaucoup de solides en suspension dans le courant d'entrée (20 à 200 mg SES/L) et très peu à la sortie (5 à 20 mg SES/L) ceci prouve que les matières décantables ont décanté en même temps que la biomasse avant la purge et que les non décantables ont été assimilés par les bactéries. Pour les étapes B et C, les solides en suspension à l'entrée étaient très faibles (décantation préalable). L'effluent du RBS contient peu de solides en suspension ce qui confirme la qualité de la décantation citée plus tôt.

4.2 Cinétique au cours d'un cycle type

Afin d'exploiter les données recueillies durant les différents cycles, la partie qui suit se propose d'étudier en détail la cinétique au cours d'un cycle type pour ensuite présenter les résultats inhérents aux autres cycles et en tirer quelques conclusions.

Le cycle 404 de l'étape C sera utilisé comme modèle.

4.2.1 Présentation d'un profil type (cycle 404, étape C)

Les figures 4.2.1 et 4.2.2 montrent les profils de l'oxygène dissous et de la biomasse mesurés durant le cycle 404. L'évolution des polluants carbonés, azotés, phosphorés durant ce cycle se trouve aux figures 4.2.3 à 4.2.5.

La caractérisation de la cinétique d'enlèvement des polluants durant un cycle doit se faire pour chaque phase, puisque les réactions biologiques sont influencées par la concentration en oxygène dissous dans le réacteur. L'écoulement est aussi déterminant dans l'établissement des bilans. Le tableau 4.2.1 résume les caractéristiques de mélange, d'aération, les variations du volume et les réactions biologiques rencontrées durant chacune des phases de la séquence étudiée.

Tableau 4.2.1: Caractéristiques des phases d'une séquence

Phase	mélange	aération	volume	réaction biologique
Remplissage	oui	non	V=Vo+Qt	?
Réaction non aérée	oui	non	V=Vtot	DN, R
Réaction aérée	oui	oui	V=Vtot	N, C, CR
Décantation	non	non	V=Vtot	non
Purge du surnageant	non	non	V=Vt-Qt	non

Légende: DN: dénitrification
R : relargage de phosphore
N : nitrification
C : captage de phosphore
CR: croissance biologique

Figure 4.2.1: Evolution de la concentration en oxygène dissous en fonction du temps durant le cycle 404, étape C

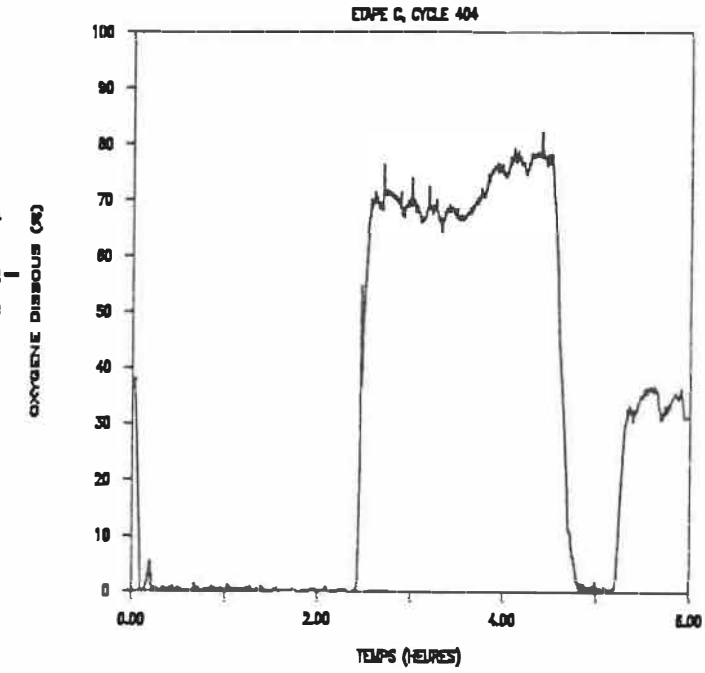


Figure 4.2.2: Evolution de la biomasse en fonction du temps durant le cycle 404, étape C

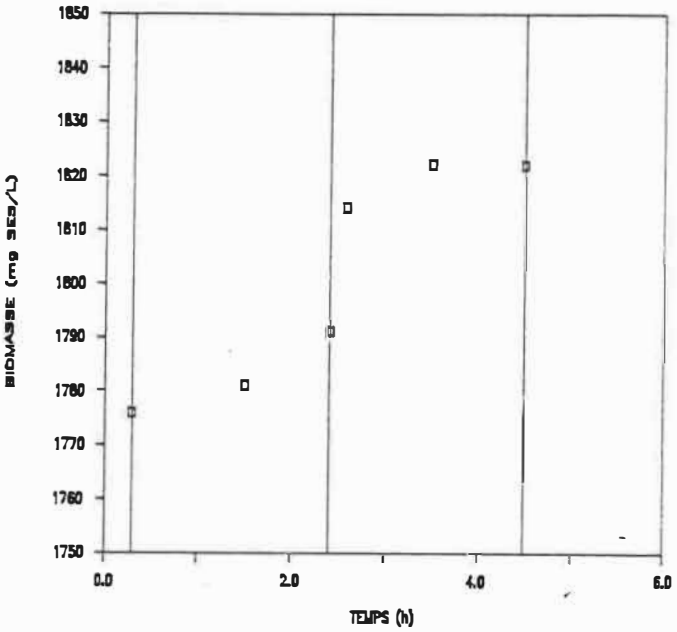


Figure 4.2.3: Evolution du carbone en fonction du temps durant le cycle 404, étape C

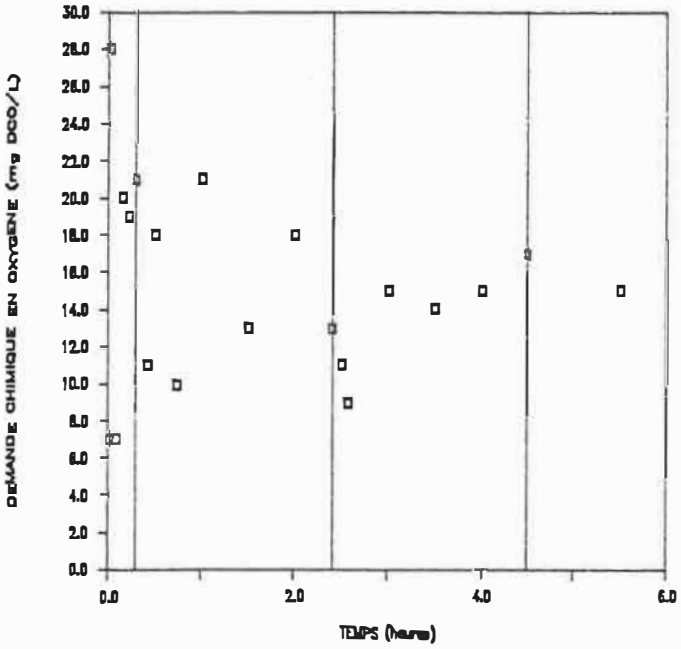


Figure 4.2.4: Evolution de l'azote en fonction du temps durant le cycle 404, étape C

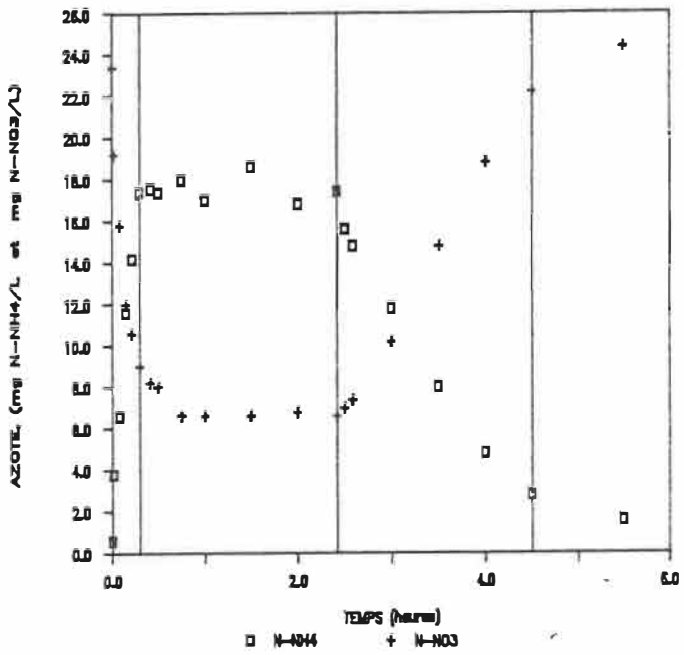
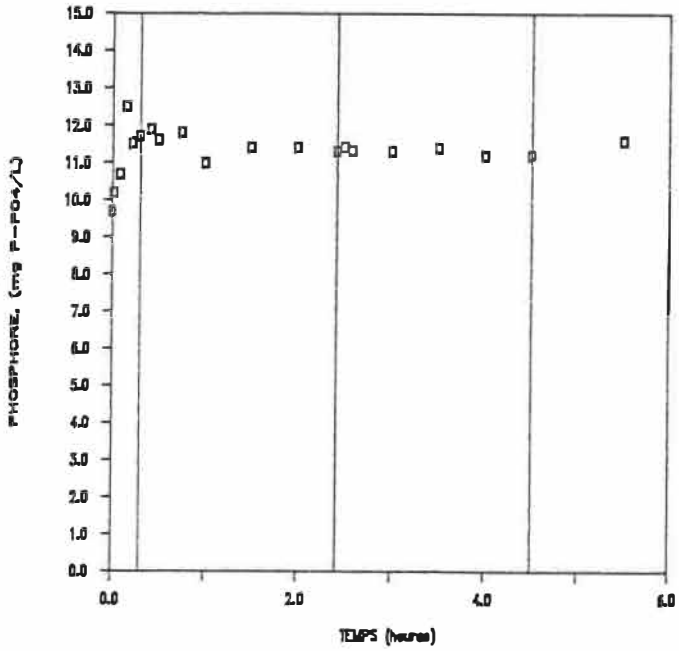


Figure 4.2.5: Evolution du phosphore en fonction du temps durant le cycle 404, étape C



4.2.2 Périodes de réaction non aérée et aérée (étape C)

4.2.2.1 Evolution de la biomasse

Durant la période de réaction non aérée, la concentration en biomasse dans le réacteur est relativement stable. La croissance biologique débute au moment de la mise en marche de l'aération, figure 4.2.2.

En période de réaction aérée, les différents types de modèles de croissance de biomasse évalués (Bailey & Ollis, 1977) proposent en premier lieu une évolution de la biomasse basée sur un bilan, en second lieu une croissance exponentielle et finalement une croissance avec un facteur d'inhibition.

Bilan sur la biomasse:

$$\frac{dX}{dt} = Rx - Rd \qquad (4.9)$$

$$\frac{dX}{dt} = Y_{C/X} * Rs - k_d * X \qquad (4.9a)$$

La biomasse ne peut être évaluée par l'application d'un bilan puisque le substrat limitant est le carbone dont la valeur ne varie pas de façon significative comme on peut le constater sur la figure 4.2.3.

Croissance exponentielle (Malthus):

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X \quad \text{--->} \quad X = Xo * \exp(\mu t) \qquad (4.10)$$

Cette équation n'est valable que lorsque Rd (taux net de dépérissement) est nul.

Croissance avec facteur d'inhibition (Velhurst):

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X * (1-B*X) \qquad (4.11)$$

$$\ln(X/1-B*X) - \ln(Xo/1-B*Xo) = k*t$$

Cette équation est représentée par une courbe sigmoïde où B=1/Xs et Xs correspondant à la concentration en biomasse durant la phase stationnaire.

En moyenne la concentration en biomasse ne varie que de 5% (100 mg/L sur une concentration de 2000 mg/L). Il n'a pas semblé pertinent de pousser plus loin le travail d'analyse des données. Néanmoins, afin de confirmer cette hypothèse, un traitement pertinent des données expérimentales pour l'équation 4.11 a montré que la cinétique avec facteur d'inhibition ne s'applique pas, une exception, le cycle 404, a montré une certaine cohérence entre les données et le modèle. Pour tous les autres calculs, la biomasse est considérée constante.

4.2.2.2 Evolution du carbone

Le carbone diminue durant les 30 premières minutes de la réaction non aérée (figure 4.2.3), puis demeure stable jusqu'à la fin du cycle. Aucun modèle cinétique ne peut vraiment caractériser ce comportement. Les valeurs de DCO se maintiennent à l'intérieur d'une fourchette étroite: les concentrations sont dans les limites des erreurs expérimentales qui sont de l'ordre de 5 à 10 mg/L en valeur absolue. Par ailleurs, selon les laboratoires du Menviq (ministère de l'environnement du Québec), la concentration minimale mesurée comme DCO avec précision serait de l'ordre de 20 à 30 mg/L.

La DCO restante peut finalement être considérée comme la partie non biodégradable de l'eau à traiter. Les mesures de DBO correspondantes montrent des valeurs presque nulles.

4.2.2.3 Evolution de l'azote

A) Période de réaction aérée

Durant la période de réaction aérée, (figure 4.2.4), la nitrification est réalisée, l'azote ammoniacal est transformé en nitrates, (figure 4.2.6). Les bilans décrivant cette réaction sont les suivants:

$$V * \frac{d(N\text{-}NH4)}{dt} = - V * q_n * X \qquad (4.12a)$$

$$V * \frac{d(N\text{-}NO3)}{dt} = + V * q_n * X \qquad (4.12b)$$

Les taux spécifiques d'utilisation d'un substrat (q_s) peuvent s'exprimer en général par 2 termes; le premier est relié à la croissance biologique tandis que le deuxième ne est indépendant de la croissance (équation 4.13)

$$q_s = \frac{\mu}{Y_{x/s}} + B \qquad (4.13)$$

Le taux spécifique de nitrification (q_n) est indépendant de la croissance, d'autre part, il peut être relié à la concentration en azote dans le milieu. Les expressions de q_n les plus fréquemment rencontrées sont celles d'ordre 0, d'ordre 1 et d'ordre 2 par rapport au substrat ainsi que le modèle de Monod. Dans ces cas-ci, le substrat limitant est l'azote sous forme ammoniacale.

a) modèle d'ordre 0 par rapport au substrat (4.14)

$$q_n = b_0 = \text{constante}$$

b) modèle d'ordre 1 par rapport au substrat (4.15)

$$q_n = b_1 * N \quad \text{--->} \quad dN/dt = - b_1 * X * N$$

après intégration: $\ln(N) = \ln(No) - (b_1 * X) * t$

c) modèle d'ordre 2 par rapport au substrat (4.16)

$$q_n = b_2 * N^2 \quad \text{--->} \quad dN/dt = - b_2 * X * N^2$$

après intégration: $1/N = 1/No - (b_2 * X) * t$

d) modèle de Monod (4.17)

$$q_n = \frac{qmax * N}{Kn + N} \quad \text{--->} \quad \frac{dN}{dt} = - \frac{qmax * N}{Kn + N} * X$$

Cette équation une fois intégrée ne permet pas de déterminer les constantes par simple régression linéaire. Différents auteurs ont proposé des techniques de linéarisation de cette équation. Les valeurs de q_n en tout point sont déterminées expérimentalement par la relation: $q_n = -dN/dt$.

i) Linéarisation de Lineweawer-Burk (1934) (4.17a)

$$\frac{1}{q_n} = \frac{Kn}{X*q_{max}} * \frac{1}{N} + \frac{1}{X*q_{max}}$$

ii) Linéarisation de Eadie (1942) et Hofstie (1952) (4.17b)

$$\frac{q_n}{N} = \frac{X*q_{max}}{Kn} - \frac{q_n}{Kn}$$

iii) Linéarisation de Langmuir (1918) (4.17c)

$$\frac{N}{q_n} = \frac{Kn}{X*q_{max}} - \frac{N}{X*q_{max}}$$

Les constantes déterminées par les différents modèles sont résumées au tableau suivant.

Tableau 4.2.2: Constantes de nitrification du cycle 404 (étape C)

Méthode	Constantes	r^2
Modèle d'ordre 0	non applicable	
Modèle d'ordre 1	$b_1 = .465\ 10^{-3}$	0.988
Modèle d'ordre 2	non applicable	
Modèle de Monod:		
Lineweaver-Burk	Kn = 8.15 $q_{max} = 7.79\ 10^{-3}$	0.995
Eadie et Hofstie	Kn = 8.97 $q_{max} = 8.18\ 10^{-3}$	0.965
Langmuir	Kn = 9.49 $q_{max} = 8.40\ 10^{-3}$	0.989

Unités: b_1: L / mg SVS h
Kn: mg / L
q_{max}: mg N-NH_4 / mg SVS h

Les modèles de Monod et d'ordre 1 s'appliquent aussi bien l'un que l'autre. Comme le modèle d'ordre 1 permet par la suite de prédire l'évolution de l'azote sous forme ammoniacale en fonction du temps en appliquant l'équation $N = No * \exp(-b_1 t)$, il sera préféré au modèle de Monod. Ce dernier, une fois intégré donne une équation de la forme suivante:

$$Kn * \ln(N/No) + (N-No) = - q_{max} * (t-to) \qquad (4.18)$$

La détermination de N en fonction du temps doit se faire par une méthode itérative.

La détermination du profil d'azote sous forme de nitrates peut se faire à l'aide de la démarche simplifiée suivante:

1) évaluer N-NH4 avec le modèle d'ordre 1

$$N\text{-}NH_4 = (N\text{-}NH_4)_0 * \exp(-b_1 * (t-t_0)) \qquad (4.19)$$

2) évaluer $N\text{-}NO_3$ en considérant $N\text{-}NH_4$ transformé

$$N\text{-}NO_3 = (N\text{-}NO_3)_0 + (N\text{-}NH_{40} - N\text{-}NH_4) \qquad (4.20)$$

Les concentrations en nitrates évaluées par cette approche simplifiée sont très proches des valeurs expérimentales (figure 4.2.7).

B) Réaction non aérée

En période de réaction non aérée, les nitrates sont consommés. La dénitrification s'exprime ainsi:

$$V * d(N\text{-}NO_3) / dt = - V * q_d * X \qquad (4.21)$$

Le taux spécifique de dénitrification, Rd, peut s'exprimer en fonction de $N\text{-}NO_3$ avec les modèles cités pour la nitrification.

Sur le graphique de l'évolution des nitrates en fonction du temps (figure 4.2.8), on remarque que les nitrates diminuent rapidement durant les 30 premières minutes puis restent constants. Ce phénomène est directement relié à l'évolution de la DCO au cours de cette même période, laquelle fut considérée, à toute fins pratiques, constante. Puisque le carbone est essentiel à la dénitrification, le taux de dénitrification pour le cycle 404 s'exprime ainsi:

$$q_d = 2.88\ 10^{-3}\ \text{mg } N\text{-}NO_3/\text{mg SVS h} \qquad \text{si DCO} > DCO_{min}$$

$$q_d = 0 \qquad \text{si DCO} < DCO_{min}$$

Figure 4.2.6: Relation entre $N\text{-}NO_3$ et $N\text{-}NH_4$ durant la période de réaction aérée du cycle 404, étape C

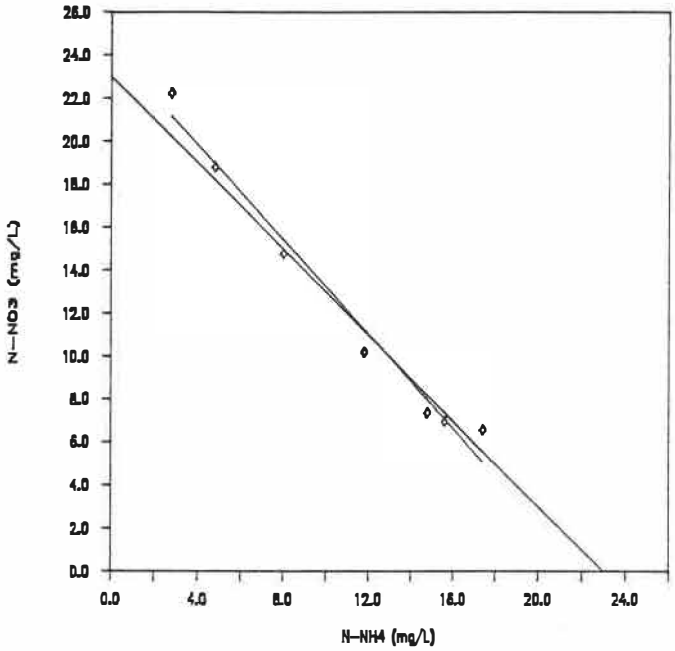
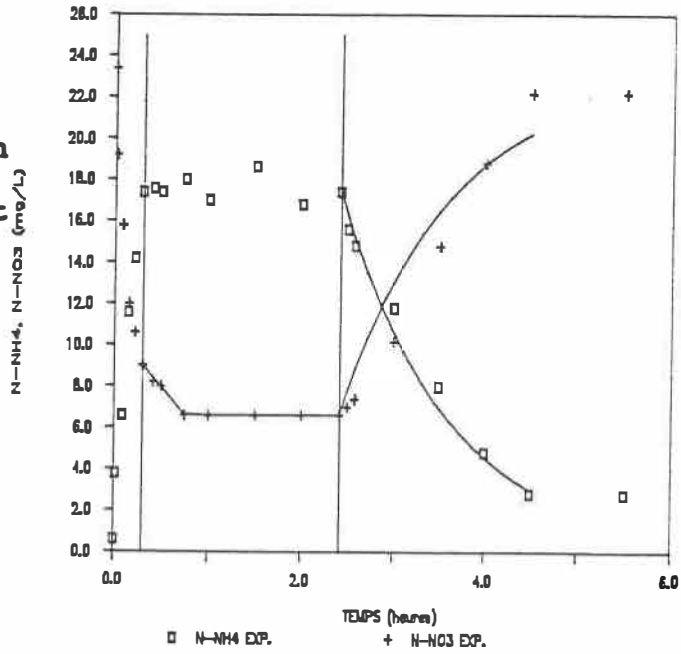


Figure 4.2.7: Estimation des $N\text{-}NH_4$ et $N\text{-}NO_3$ en fonction du temps durant la période de réaction aérée du cycle 404, étape C.



4.2.2.4 Evolution du phosphore

La déphosphatation biologique n'a pas eu lieu durant le cycle 404, puisque la dénitrification n'a pas été complétée, de plus le carbone nécessaire au stockage de PHA n'était pas disponible. En conséquence, le relargage du phosphore en phase anaérobie et le captage en phase aérobie n'ont pas été observés.

Lorsque le captage de phosphore est apparent, les modèles d'ordre 0 et d'ordre 1 par rapport au substrat sont appliquables.

4.2.3 Période de remplissage

Durant le remplissage, on désire déterminer comment les polluants se comportent en utilisant les constantes cinétiques trouvées durant les périodes de réaction. De façon générale, trois hypothèses sont testées: a) remplissage sans réaction biologique, b) remplissage avec réaction d'ordre 0 et c) remplissage avec utilisation du substrat pour synthèse.

A) Remplissage sans réaction biologique

Bilan de matière: $dV/dt = Q$ et $V = Vo + Qt$

Bilan sur un composé: $\frac{VdC}{dt} + \frac{CdV}{dt} = Q * Ce$

où C: conc. d'un polluant (mg/L)
Ce: conc. à l'entrée (mg/L)
Q : débit (L/h)

Forme intégrée: $C = \frac{V_o*C_o + C_e*Qt}{Vo + Qt}$ (4.22)

B) Remplissage avec réaction biologique d'ordre 0

Bilan de matière: $dV/dt = Q$ et $V = Vo + Qt$

Bilan sur la biomasse: $\frac{VdX}{dt} + \frac{XdV}{dt} = 0$

et: $X = \frac{X_0*V_0}{V_0+Qt} = \frac{X_{tot}*V_{tot}}{V_0+Qt}$

Bilan sur un composé: $\frac{VdC}{dt} + \frac{CdV}{dt} = Q * Ce + q_c * V * X$

$q_c = b_0 = \text{constante}$

Forme intégrée:

$C = \frac{1}{Vo+Qt} * (V_0*C_0 + (Q*C_e + b_0 *V_0*X_0) * t)$ (4.23)

L'équation 4.23 peut être réorganisée:

$C - \frac{V_0*C_0}{Vo+Qt} = (Q*C_e + b_0 *V_0*X_0) * \frac{t}{Vo+Qt}$ (4.24)

La valeur de la pente du graphique de $[C-C_0V_0/(V_0+Qt)]$ en fonction de $[t/(V_0+Qt)]$ s'obtient par régression linéaire et permet de calculer la constante cinétique d'ordre 0:

$$b_0 = \frac{(\text{pente} - Q*C_e)}{(V_0*X_0)} \qquad (4.25)$$

Dans la mesure où la valeur de la constante b_0 est négative; le polluant est consommé. Si la constante b_0 est positive, il y a production du polluant.

C) Remplissage avec utilisation du substrat pour synthèse

Bilan de matière: $dV/dt = Q$ et $V = Vo + Qt$

Bilan sur la biomasse: $\frac{VdX}{dt} + \frac{XdV}{dt} = 0$

et: $X = \frac{X_0*V_0}{V_0+Qt} = \frac{X_{tot}*V_{tot}}{V_0+Qt}$

Bilan sur un composé: $\frac{VdC}{dt} + \frac{CdV}{dt} = Q * Ce - V*Y_{c/x}*R_x$

et $R_x = \frac{X}{TRC * 4 * T_r}$

4: nombre de cycles par jour
T_r: durée du remplissage (h)
$Y_{c/x}$: rendement substrat/biomasse

Forme intégrée:

$$C = \frac{1}{Vo+Qt} * \left(V_0*C_0 + \left(Q*C_e - \frac{V_0*X_0*Y_{c/x}}{TRC * 4 * T_r}\right) * t\right) \qquad (4.25)$$

Les conclusions relatives au remplissage du cycle 404 sont discutées avec celles des autres cycles au point suivant.

4.2.4 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape A

Durant l'étape A, deux cycles ont été isolés. Pour le premier, le cycle 108 (tableau 4.2.3), trop peu d'échantillons ont été prélevés pour permettre une bonne analyse. Cette première expérience a permis de constater que des réactions biologiques avaient lieu durant le remplissage. On a donc dû procéder à un échantillonnage à intervalle très rapproché (3 à 4 min.) durant cette phase.

Un suivi du cycle 290 a été effectué, les données d'échantillonnage se trouvent au tableau 4.2.4 et à la figure 4.2.4, les résultats de l'analyse cinétique sont regroupés au tableau 4.2.5

Tableau 4.2.3: Résultats d'échantillonnage cycle 108, étape A

	TEMPS (h)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	DCO (mg/L)	Ptot (mg/L)
Alimentation:				162	
Remplissage:	0.250	1480	875	40	2.2
Réaction aérée:	1.000	1330	800	38	1.9
	1.500	1530	925	39	1.7
	2.000	1435	875		1.4
	2.750	1490	870	29	
	3.500	1270	770	36	1.7
	4.000	1380	900	31	1.1
Décantation:	4.500	1350	870	30	1.3
Purge:	5.500			33	1.6

Tableau 4.2.4: Résultats d'échantillonnage, cycle 290, étape A

	TEMPS (h)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
Alimentation:				55	2.1	7.0	1.0
Remplissage:	0.000			20	1.5	0.6	7.1
	0.017			22	1.5	1.2	6.5
	0.083			20	1.5	1.6	4.8
	0.150			27	1.5	2.0	4.2
	0.233			27	1.5	2.4	3.8
Réaction aérée:	0.333			23	1.5	2.6	4.0
	0.500			17	1.5	2.0	4.4
	0.750			24	1.4	1.4	5.0
	1.000	2020	1175	20	1.4	1.0	5.8
	1.500			18	1.3	0.8	6.4
	1.667			14	1.4	0.6	6.6
	1.833	1953	1127	16	1.4	0.8	6.4
	2.000			23	1.4	0.8	6.6
	2.500			18	1.4	0.6	6.8
	3.000	1907	1013	13	1.4	0.8	6.6
	3.167				1.4	0.8	7.0
	3.333				1.4	0.8	7.4
	3.500			17	1.4	0.6	6.8
	4.000			17	1.4	0.8	6.8
Décantation:	4.500	1907	1083	22	1.4	1.0	7.0
Purge:	5.500			12	1.5	0.2	8.8

Figure 4.2.8: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 290, étape A

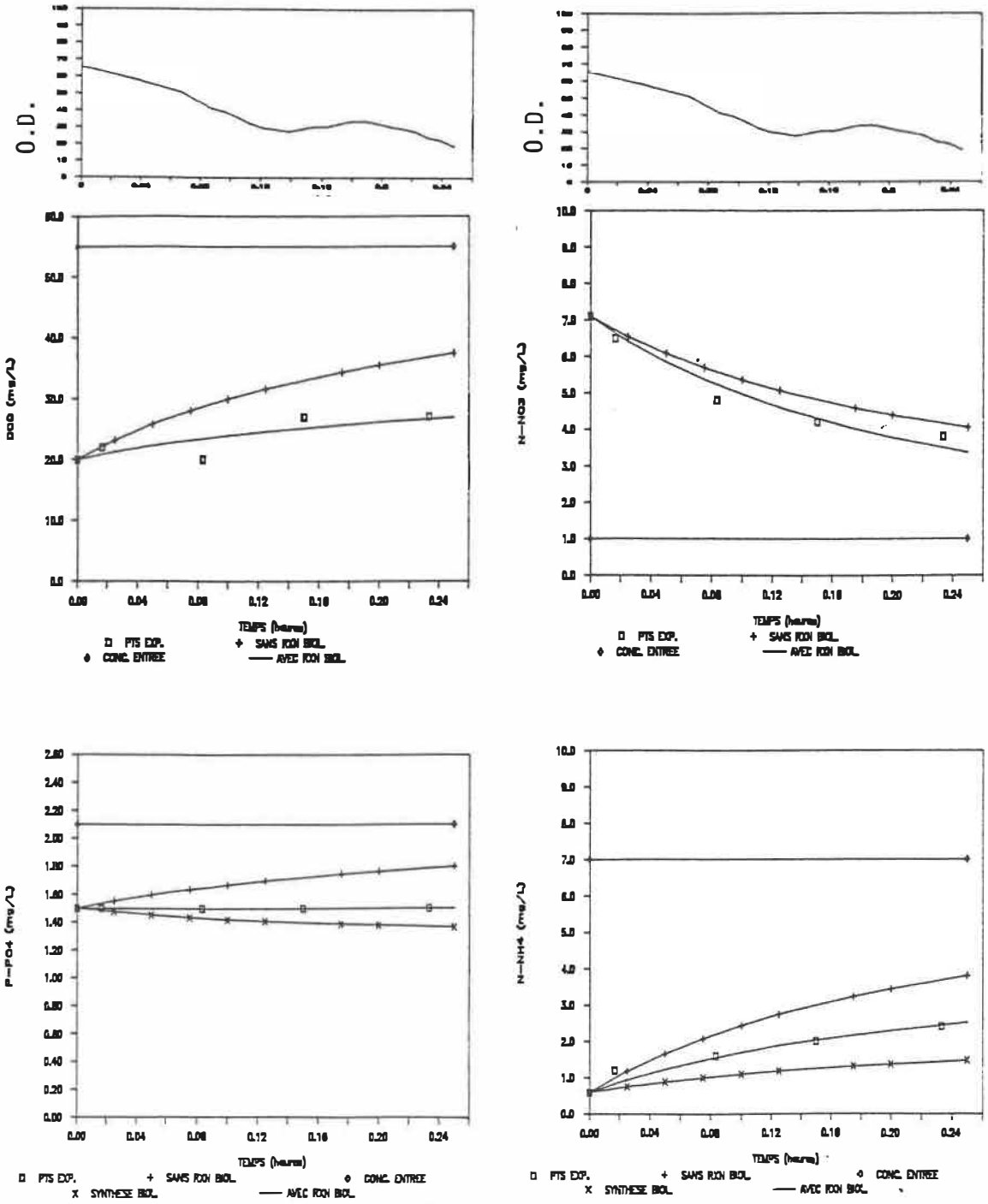


Tableau 4.2.5: Constantes cinétiques du cycle 290 de l'étape A

Phase	Composé	Commentaires	Constantes
Réaction aérée	Carbone N-NH4 N-NO3 P-PO4	Stable: 19 ± 4 Nitrif.: ordre 1 Nitrif.: ordre 1 Stable: 1.4 ± 0.1	 $b_1 = 0.928\ 10^{-3}$ $b_1 = 0.928\ 10^{-3}$
Remplis-sage	Carbone N-NH4 N-NO3 P-PO4	Avec réaction biol. Synthèse Sans réaction biol. Synthèse	$b_0 = 38.3\ 10^{-3}$
	Biomasse	SES: 1950 mg/L, SVS: 1100 mg/L TRC: 14.4 j	

Légende: voir tableau 4.2.12

Durant la période de réaction aérée, la concentration en carbone est relativement stable à 19 ± 4 mg/L, de même que la concentration en phosphore à 1.4 ± 0.1 mg/L. La nitrification est constatée.

Durant la période de remplissage, il n'y a aucune augmentation de la DCO dans le réacteur comme le prévoyait le modèle ne considérant pas de réaction biologique. La partie biodégradable de la DCO est automatiquement prise par la biomasse, ce qui donne un profil plat de la DCO en fonction du temps (figure 4.2.8). La DCO capturée durant le remplissage est probablement assimilée au début de la période de réaction. Ce comportement montre que le carbone est limitant. Le profil du phosphore suit la courbe

générée par l'hypothèse d'une consommation due à la synthèse biologique. L'azote ammoniacal est aussi utilisé pour des fins de synthèse. Les nitrates ne peuvent pas être dénitrifiés puisque l'oxygène est présent durant la phase de remplissage.

4.2.5 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape B

Les constantes des cycles 103 et 214 de l'étape B sont présentées au tableau 4.2.8. Les données d'échantillonnage relatives à ces cycles se trouvent aux tableaux 4.2.6 et 4.2.7.

Tableau 4.2.6: Résultats d'échantillonnage, cycle 103, étape B

	TEMPS (h)	SVS (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
Alimentation:			129	8.6	10.8	1.0
Remplissage:	0.000		20	4.8	0.0	12.0
	0.017		22	5.0	1.4	9.8
	0.083		25	5.3	2.4	9.2
	0.150		13	5.6	3.0	5.6
	0.233		18	6.1	4.6	3.4
Réaction aérée:	0.333		18	6	4.2	4.0
	0.500		23	5.9	3.2	4.8
	0.750		14	5.7	2.0	6.0
	1.000		13	5.7	1.2	7.8
	1.500		18	5.6	1.4	9.8
Réaction non aérée	1.667		12	5.7	0.8	9
	1.833		10	5.7	1	9
	2.000		15	5.7	0.8	8.8
	2.500		14	5.6	0.8	8.6
Réaction aérée:	3.000		13	5.6	1.0	8.2
	3.167		13	5.5	1.0	8.8
	3.333		8	5.5	1.0	9.0
	3.500		13	5.4	1.2	8.6
	4.000		23	5.3	1.4	8.4
Décantation:	4.500	1160	23	5.2	1.2	9.0
Purge:	5.500		19	5.1	0.2	10.2

Tableau 4.2.7: Résultats d'échantillonnage, cycle 214, étape B

	TEMPS (h)	SES (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
Alimentation:			148	5.2	14.00	0.78
Remplissage:	0.000		23	3.8	0.16	3.20
	0.017		27	3.9	0.31	2.36
	0.083		23	4.2	2.60	0.68
	0.150		36	4.9	4.60	0.58
Réaction aérée:	0.250	2356	42	5.4	6.20	0.56
	0.333		25	4.7	5.60	0.56
	0.500		34	4.5	4.60	1.20
	0.750		29	4.4	3.60	2.10
	1.000	2244	29	4.3	2.80	2.24
	1.250		30	4.1	1.92	3.84
Réaction non aérée	1.500		15	4.1	1.72	3.78
	1.750		20	4	1.56	2.44
	2.000	2222	31	4.0	1.56	4.20
	2.500		20	3.8	1.06	4.20
	3.000	2233	23	3.9	0.70	5.56
	3.500		27	3.8	0.16	6.46
Réaction aérée:	4.000	2256	19	3.7	0.10	6.70
	4.167		11	3.7	0.12	6.58
	4.333		21	3.6	0.10	6.80
Décantation:	4.500	2278	32	3.6	0.08	7.08
Purge:	5.500		24	3.6	0.06	6.98

Figure 4.2.9: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 103, étape B

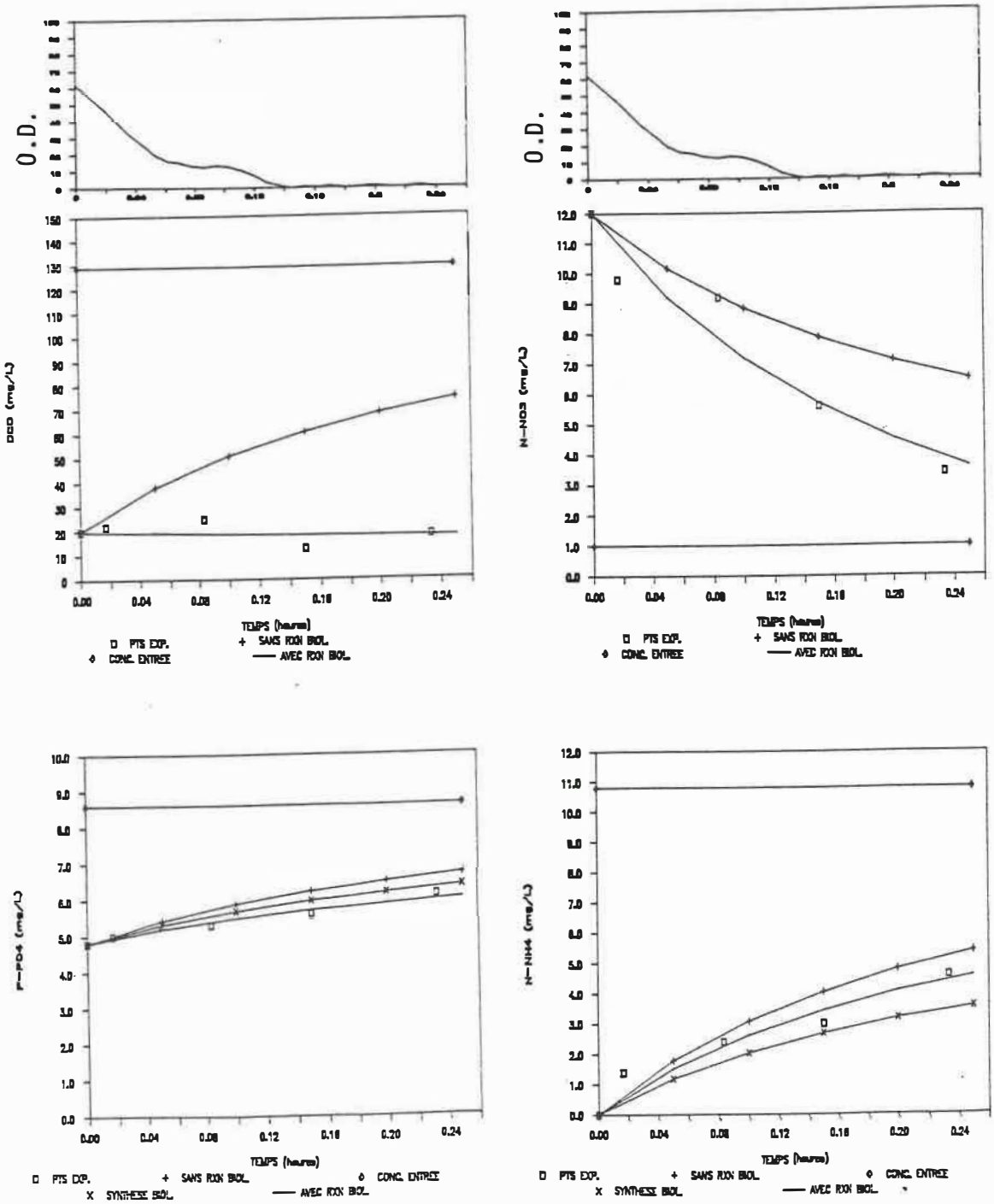


Figure 4.2.10: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 214, étape B

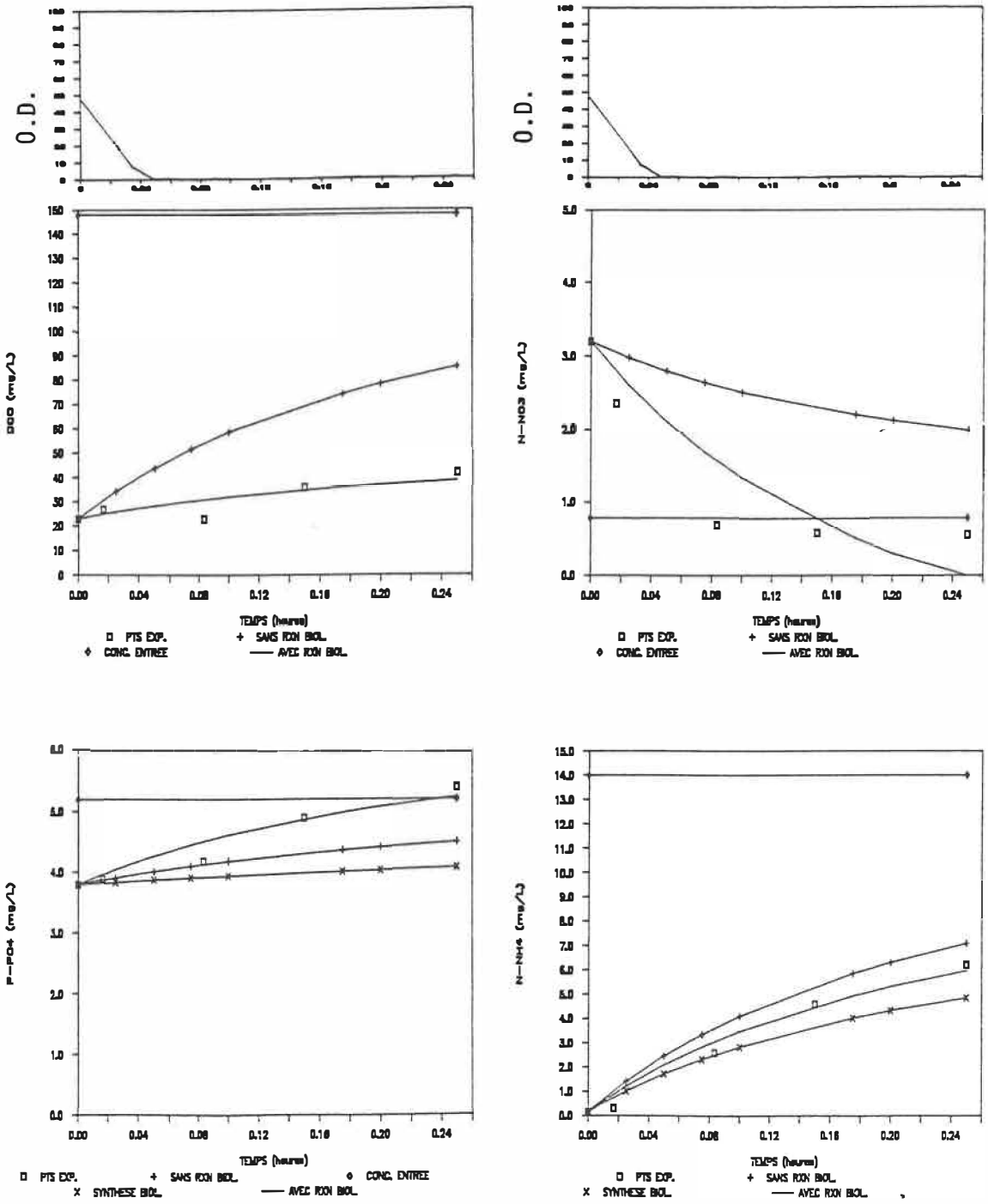


Tableau 4.2.8: Constantes cinétiques des cycles 103 et 214 de l'étape B

Composé	Constantes cinétiques Cycle 103	Cycle 214
Réaction aérée # 1		
Carbone	S: 17 ± 4	S: 29 ± 8
Azote	N: b_1= 1.56 10^{-3}	N: b_1 = 0.76 10^{-3}
Phosphore	C: b_1= 0.11 10^{-3}	C: b_1 = 0.10 10^{-3}
Réaction non aérée		
Carbone	S: 14 ± 3	S: 22 ± 5
Azote	D:b_1=0.069 10^{-3}	
Phosphore	S: 5.6 ± .1	C:b_1= 0.029 10^{-3}
Réaction aérée # 2		
Carbone	S: 16 ± 7	S: 21 ± 8
Azote NH4	S: 1.2 ± .2	S: 0.1 ± .02
NO3	S: 8.8 ± .2	S: 6.8 ± .2
Phosphore	S: 5.5 ± .1	S: 3.6 ± .1
Remplissage		
Carbone	A: b_0= 0.207	A: b_0= 2.01
Azote NH4	Synthèse	Synthèse
NO3	D: b_0= 10.5 10^{-3}	D: b_0= 88.7 10^{-3}
Phosphore	Synthèse	R: b_0= 33.1 10^{-3}
Biomasse	SES: 1950 mg/L SVS: 1160 mg/L TRC: 19.3 j	SES: 2280 mg/L SVS: 1390 mg/L TRC: 19.0 j

Légende: voir au tableau 4.2.12

Durant la première période de réaction aérée, la nitrification est effectuée. Les constantes mesurées pour la nitrification sont du même ordre de grandeur pour ces

cycles. Le carbone étant encore disponible durant cette période, un léger captage du phosphore a été remarqué.

Durant la période de réaction non aérée, la dénitrification se fait difficilement puisque le carbone n'est plus disponible. De ce fait, durant la deuxième période de réaction aérée, il n'y a aucune réaction biologique apparente dans le RBS.

Durant le remplissage, le carbone est absorbé par les microorganismes au moment où il arrive dans le milieu. L'azote ammoniacal est utilisé comme nutriment nécessaire à la synthèse. L'azote sous forme de nitrates est dénitrifié. Le rendement est meilleur que durant la période de réaction non aérée; ceci s'explique par la disponibilité du carbone en période de remplissage. Le phosphore est consommé pour fin de synthèse durant le cycle 103. Au cycle 214, le remplissage se termine en conditions anaérobies (sans oxygène, sans nitriates), ce qui a pour effet de provoquer un relargage de phosphore.

4.2.6 Résultats obtenus sur les cycles de l'étape C

Les données d'échantillonnage et les constantes cinétiques des cycles 316, 404 et 428 de l'étape C se trouvent aux tableaux 4.2.9 à 4.2.12.

Tableau 4.2.9: Résultats d'échantillonnage, cycle 316, étape C

	TEMPS (h)	SVS (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)	P/SVS (%)
Alimentation:			120	9.7	27.6	1.2	
Remplissage:	0.017		61	0.6	6.6	1.2	
	0.083		34	2.0	12.0	1.0	
	0.150		41	2.7	14.8	0.6	
	0.217		35	3.5	15.2	0.7	
Réaction non aérée	0.250		42	3.9	17.2	0.8	1.55
	0.333		36	3.5	17.0	0.7	
	0.417		35	2.9	17.4	0.8	
	0.500		38	4.1	17.6	0.8	
	1.000		34	4.1	16.2	0.8	
	1.500		36	4.3	16.0	0.7	1.72
	2.000		27	3.8	16.0	0.8	
Réaction aérée:	2.417		32	3.8	16.0	0.7	
	2.500		26	3.2	15.0	0.7	
	2.583		28	2.5	15.4	0.7	1.81
	3.000		27	0.5	14.0	0.8	
	3.500		27	0.2	14.0		2.17
	4.000		27	0.2	12.0	1.7	
Décantation:	4.500	690	27	0.2	9.0	1.1	2.12
Purge:	5.500		38	0.2	8.0	2.8	

Tableau 4.2.10: Résultats d'échantillonnage, du cycle 404, étape C

	TEMPS (h)	SES (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
Alimentation:			145	17.4	39.2	1.4
Remplissage:	0.000		7	9.7	0.6	23.4
	0.017		28	10.2	3.8	19.2
	0.083		7	10.7	6.6	15.8
	0.150		20	12.5	11.6	12.0
	0.217		19	11.5	14.2	10.6
Réaction non aérée	0.300	1776	21	11.7	17.4	9.0
	0.417		11	11.9	17.6	8.2
	0.500		18	11.6	17.4	8.0
	0.750		10	11.8	18.0	6.6
	1.000		21	11.0	17.0	6.6
	1.500	1781	13	11.4	18.6	6.6
	2.000		18	11.4	16.8	6.8
Réaction aérée:	2.417	1791	13	11.3	17.4	6.6
	2.500		11	11.4	15.6	7.0
	2.583	1814	9	11.3	14.8	7.4
	3.000		15	11.3	11.8	10.2
	3.500	1822	14	11.4	8.0	14.8
	4.000		15	11.2	4.8	18.8
Décantation:	4.500	1822	17	11.2	2.8	22.2
Purge:	5.500		15	11.6	1.6	24.4

Tableau 4.2.11: Résultats d'échantillonnage, cycle 428, étape C

	TEMPS (h)	SES (mg/L)	DCO (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
Alimentation:			190	6.0	20.0	1.0
Remplissage:	0.000		12	4.7	1.0	5.0
	0.017		15	4.8	2.8	4.3
	0.083		14	4.9	5.0	3.8
	0.150		9	5.0	7.3	3.0
	0.200		11	5.1	7.6	2.6
Réaction non aérée	0.250	2156	16	5.3	8.8	2.4
	0.333		1	5.2	9.2	2.0
	0.417		14	5.1	9.4	2.2
	0.500		0	5.1	9.2	2.0
	0.750		16	5.0	9.6	1.8
	1.000		24	5.0	9.2	2.0
	1.500	2223	23	5.0	9.4	1.9
	2.000		18	4.9	9.0	1.8
Réaction aérée:	2.417	2210	19	4.9	9.6	1.9
	2.500		13	4.9	8.4	2.0
	2.583	2219	29	5.2	7.6	2.4
	3.000		18	4.9	5.2	3.4
	3.500	2208	17	4.8	2.4	6.0
	4.000		17	4.7	2.2	7.2
Décantation:	4.500	2254	4	4.6	1.8	6.2
Purge:	5.500		16	4.8	0.2	13.8

Figure 4.2.11: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 316, étape C

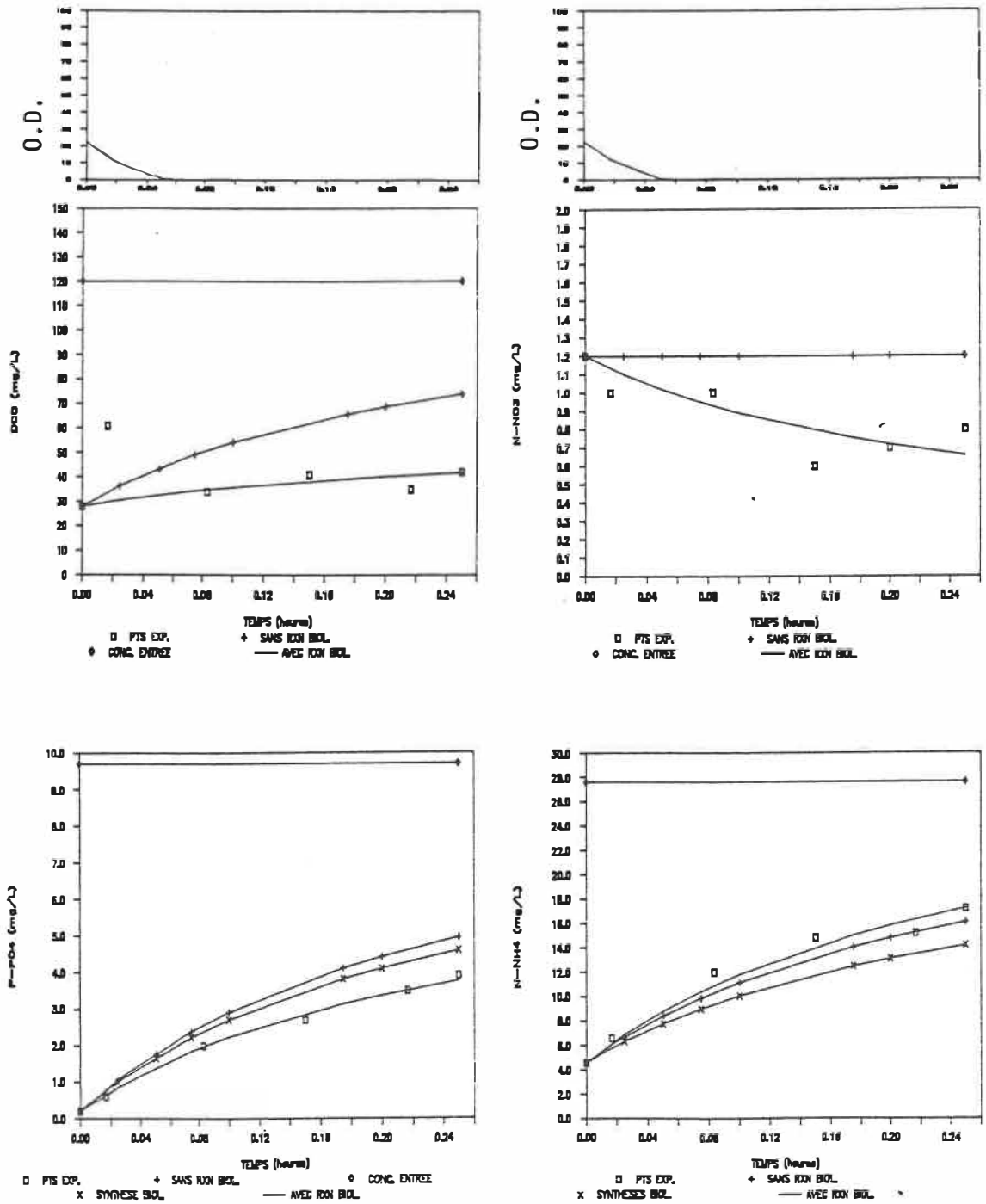


Figure 4.2.12: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 404, étape C

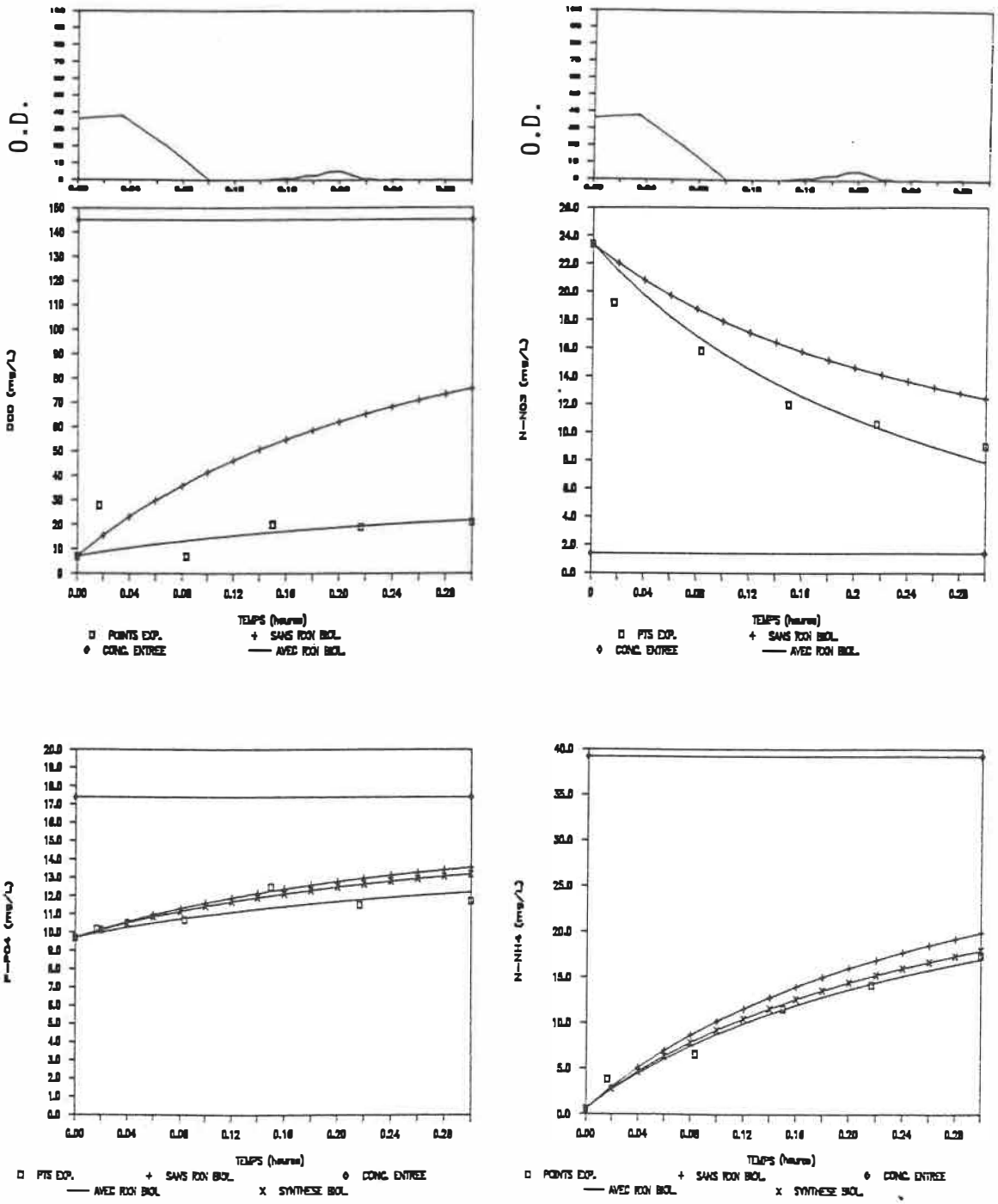


Figure 4.2.13: Comportement des polluants C/N/P en remplissage, cycle 428, étape C

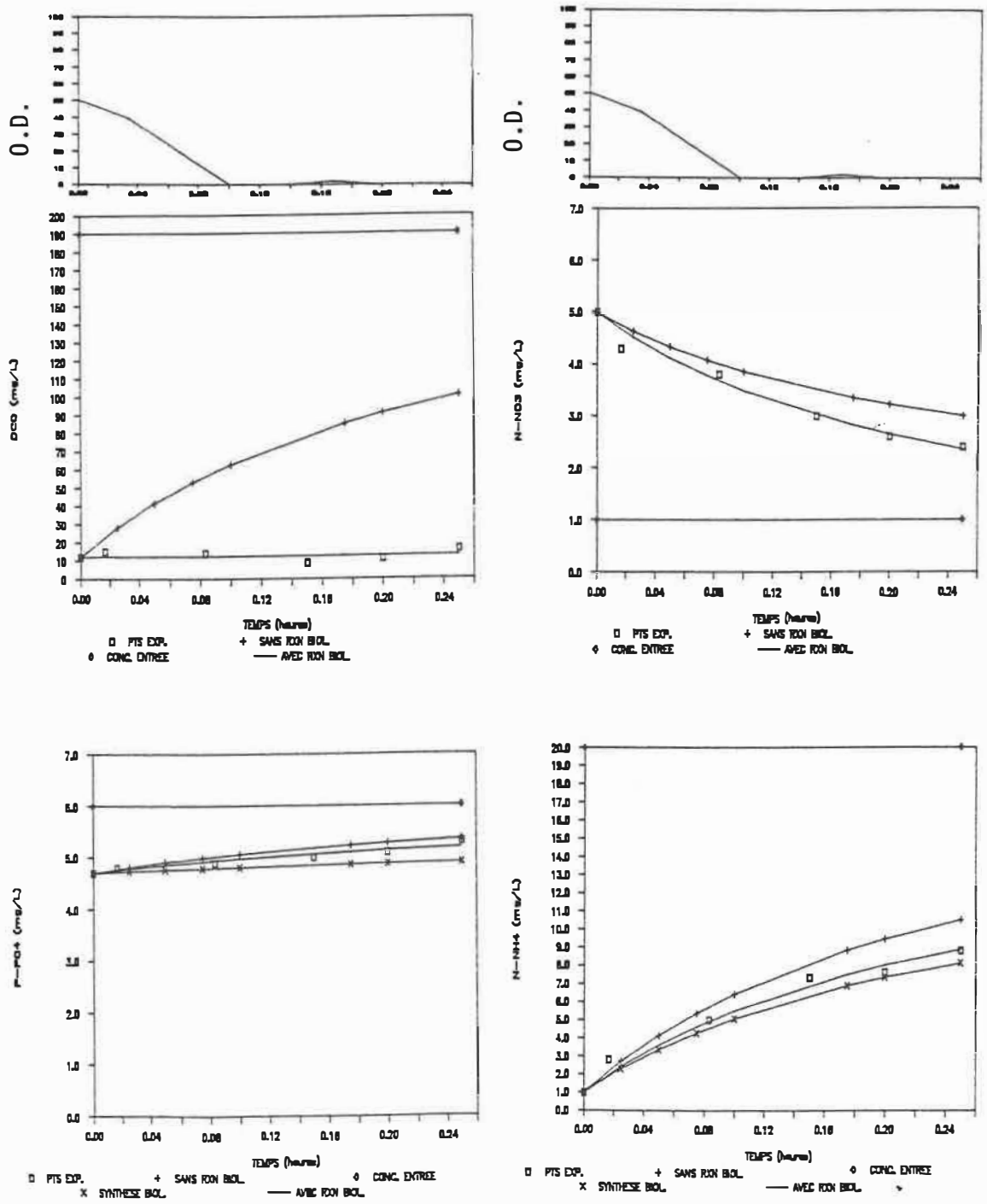


Tableau 4.2.12: Constantes cinétiques des cycles 316, 404 et 428 de l'étape C

Cycle	316	404	428
Réaction non aérée			
Carbone	S: 36 ± 3	S: 16 ± 4	S: 19 ± 4
Azote NH4	S: 16 ± 5	S: 17 ± 1	
NO3	S: 0.8	D:b_0=4.73 10^{-3}	D:b_0=0.87 10^{-3}
		S: 6.6	S: 1.8
Phosphore	C + R	S: 11.5 + .3	S: 5.0 ± .1
Réaction aérée			
Carbone	S: 28 ± 2	S: 13 ± 3	S: 17 ± 7
Azote	N:b_1=0.36 10^{-3}	N:b_1=0.76 10^{-3}	N:b_1=0.62 10^{-3}
Phosphore	C:b_1=0.415	S: 11.3±.1	C:b_1=0.04 10^{-3}
Remplissage			
Carbone	A:b_0=186 10^{-3}	A:b_0=99.7 10^{-3}	A:b_0=256. 10^{-3}
Azote NH4	Synthèse	Synthèse	Synthèse
NO3	D:b_0=3.14 10^{-3}	D:b_0=8.35 10^{-3}	D:b_0=1.87 10^{-3}
Phosphore	Synthèse	Synthèse	Synthèse
Biomasse	SES: 1090	1810	2215
	SVS: 690	1100	1375
	TRC: 11.0	20.5	17.6

Légende: A: remplissage avec réaction biologique
C: captage du phosphore
N: nitrification
D: dénitrification
R: relargage du phosphore
S: concentration stable (moyenne ± écart-type)
TRC: temps de résidence des cellules (jours)
b_0: constante du modèle d'ordre 0 (mg/mg SVS h)
b_1: constante du modèle d'ordre 1 (L/mg SVS h)

Durant la période de réaction aérée, la nitrification est modèlisée par un taux de nitrification d'ordre 1 par rapport à l'azote sous forme ammoniacale. Il est difficile de comparer les constantes avec celles obtenues par d'autres auteurs puisqu'elles varient en fonction du type d'opération du réacteur (continu versus cuvée) et du type d'eau usée. Melcer et al (1987) ont déterminé des taux spécifiques de nitrification dans un RBS en considérant un modèle d'ordre 0; il obtiennent des valeurs variant de 0.33×10^{-3} à 1.08×10^{-3} mg/mg h.

Les taux de dénitrification, en période de réaction non aérée sont constants (ordre 0 par rapport à $N\text{-}NO_3$) puis deviennent nuls après un certain temps. Ceci est en relation directe avec la DCO, car la présence de carbone étant essentielle pour induire la dénitrification.

On remarque une consommation rapide du phosphore en période de réaction aérée pour le cycle 316. Ceci peut s'expliquer du fait qu'il n'y ait pas de nitrates durant la phase non aérée. Le peu de nitrates produits a été dénitrifié durant le remplissage. Le carbone, au cours de ce cycle, est aussi à son plus bas niveau. Cette remarque pourrait confirmer l'hypothèse voulant que le carbone est absorbé durant le remplissage et assimilé durant la période de réaction. Il pourrait donc être utilisé pour former les PHA caractérisant l'étape précédant

l'accumulation du phosphore par les bactéries. Le phénomène de relargage de phosphore durant la période de réaction non aérée n'a pas été observé.

Comme pour les cycles précédents, la période de remplissage est caractérisée par la consommation du carbone, par l'utilisation des $N\text{-}NH_4$ et des $P\text{-}PO_4$ pour la synthèse biologique et finalement par la dénitrification des nitrates.

CHAPITRE 5: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La première étape (A), a permis de montrer que le traitement par RBS d'effluents dilués dont l'alimentation est réalisée en intégrant le concept "sélecteur" permet d'excellents rendements d'enlèvement de polluants: le carbone et l'azote ammoniacal sont éliminés à plus de 95%. La DCO restante est considérée comme non biodégradable, hypothèse vérifiée par des mesures de DBO qui tendent vers zéro.

De plus, tout au long de l'étape A, la biomasse a gardé d'excellentes propriétés de décantation, ce qui a eu comme conséquence de produire un surnageant contenant très peu de matières en suspension. Cette remarque se révèle être d'une très grande importance, car elle confirme qu'en utilisant l'approche "sélecteur", il est possible de conserver une biomasse en santé et dépourvue de bactéries filamenteuses même lorsqu'une faible concentration de carbone est alimentée au réacteur.

L'étape B devait favoriser la nitrification puis la dénitrification. La nitrification a été complétée à 95%, mais la dénitrification n'a pas eu lieu pour la plupart des cycles. Le problème semble être lié au fait que du carbone doit absolument être présent durant la période de réaction non aérée; cette dernière suivait la période de

réaction aérée durant laquelle tout le carbone avait été consommé.

Les réactions de nitrification et de dénitrification ont été mieux complétées durant l'étape C qui consistait en une période de réaction non aérée suivie d'une période de réaction aérée. Durant la deuxième partie de l'étape C, la concentration en DCO dans l'alimentation a été diminuée d'un facteur 2, en conséquence, la concentration en biomasse a diminuée, mais la présence de bactéries filamenteuses n'a pas été remarquée. Encore une fois, la qualité de la biomasse peut être attribuée à une alimentation rapide.

Les suivis des polluants au cours de certains cycles ont permis de confirmer certaines hypothèses:

a) Le carbone est absorbé durant le remplissage et assimilé au début de la période de réaction (environ 30 minutes).

b) La nitrification suit une cinétique d'ordre 1 par rapport à l'ammoniaque durant les périodes de réaction aérées. Le taux spécifique de nitrification est indépendant de la croissance biologique. Ce modèle permet d'estimer le profil de concentration en nitrates durant cette même période.

c) La dénitrification se fait lors d'une période de réaction non aérée suivant le remplissage. Le facteur limitant est alors le carbone disponible. Par ailleurs, la dénitrification s'effectue durant un remplissage non aéré.

d) Une déphosphatation par sur-accumulation biologique est remarquée lorsque les nitrates sont en faibles concentrations durant la période de réaction aérée.

e) Le cycle (316, étape C) qui a montré une accumulation de phosphore au-delà des quantités normales requises à la synthèse biologique ne dévoile pas de relargage de phosphore durant la période de réaction non aérée.

L'étude des cinétiques de réaction en mode de remplissage ou en mode cuvée les plus pertinentes sur chacun des polluants durant un cycle complet permet de décrire le comportement de ces polluants en plus de comprendre l'influence des polluants entre eux et sur l'activité biologique.

Une approche basée sur les équations cinétiques, sur l'hydraulique de mélange et sur les bilans de matière permet de dégager des équations de design. Ces dernières servent à estimer la longueur de chaque phase d'une séquence.

Le facteur limitant l'enlèvement du phosphore par voie biologique est la présence de nitrates dans le milieu réactionnel en période non aérée. Pour éliminer ces nitrates, il est essentiel d'avoir du carbone encore disponible lequel constitue l'élément limitant à la dénitrification. On peut proposer diverses techniques afin d'augmenter la concentration en carbone.

1) Comme la décantation ne pose pas de problème, il serait envisageable de purger les deux-tiers du réacteur et de remplacer ce volume par de l'alimentation fraîche, tout en gardant un remplissage de courte durée.
2) Les cycles pourraient être de plus courte durée. En effet, après un certain temps, on ne note plus de réaction; les microrganismes étant en attente continuelle de carbone, ils le consomment très rapidement lorsqu'il est ajouté au réacteur.
3) Selon Abufayed (1986), les boues primaires peuvent servir comme carbone additionnel.

Le contrôle des séquences sur une base temporelle s'avère efficace, mais la durée des séquences pourrait être optimisée ou adaptée selon l'alimentation s'il était possible de contrôler en ligne, par un paramètre indirect, les substrats limitants tels le carbone et les nitrates.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABUFAYED, A.A. et E.D. SCHROEDER, -Performance of SBR/denitrification with a primary sludge carbon source,- Journal WPCF, vol. 58, no 5, mai 1986a, pp 387-397.

ABUFAYED, A.A. et E.D. SCHROEDER, -Kinetics and stoechiometry of SBR/denitrification with a primary sludge carbon source,- Journal WPCF, vol. 58, no 5, mai 1986b, pp 398-405.

ALARCON, G.O., -Removal of phosphoru sewage,- Thèse de maîtrise, Université de John Hopkins, Baltimore, MD, 1961.

ALLEMAN, James E. et Robert L. IRVINE, - Nitrification in the sequencing batch reactor,- Journal WPCF, vol. 52, no 11, novembre 1980, pp 2747-2757.

APHA, Americal Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (APHA, AWWA, WPCF) 16 th edition, 1985 .

AUDIC, J.M., M. MEGANCK, G. CARAND et G.M. FAUD, - Elimination de la pollution phosphorée par voie biologique; principe et mise en oeuvre,- 10e Symposium sur le traitement des eaux usées, 1987, pp 53-65.

BAILEY, J.E. et D.F. OLLIS, Biochemical Engineering Fundmentals, Ed. McGraw Hill Book Company, New York, 1977.

BARNARD, J.L., -Bacground to biological phosphoru removal, -Wat. Sci. Tech., vol. 15, 1983, pp 1-13.

BEER, C. et L.K. WANG, -Activated sludge systems using nitrate respiration: design considerations,- Journal WPCF, sept. 1988, pp 2120-2131.

BLANCHARD, B., -Discussion,- dép. génie civil, Ecole Polytechnique de Montréal, 1990.

BRODISH, K.E.U. et S.J. JOYNER, -The role of microorganisms other than *Acinetobacter* in biological phosphate removal in activated sludge processes,- Wat. Sci. Tech., vol. 15, 1983, pp 117-125.

CARLSON, D.E., -Nitrogen removal and denitrification for water quality control,- OWRR, University of Washington, 1971.

COMEAU Y., K.J. HALL, R.E.W. HANCOCK et W.K. OLDHAM, -Biochemical phosphorus removal,- Water ressearch, vol. 20, no 12, 1986, pp 1511-1521.

COMEAU, Y., -La déphosphatation biologique: métabolisme microbien,- Sciences et techniques de l'eau, vol. 23, fév. 1990, pp 47-60.

COMEAU, Yves, Barry RABIONWITZ, Kenneth J. HALL et William K. OLDHAM, - Phosphate release and uptake in enhanced

biological phosphorus removal from wastewater,- Journal WPFC, vol. 59, no 7, juillet 1987, pp 707-715.

CRISTENSEN, M.H. et P. HARREMOES, -Biological denitrification in water treatment: A litterature review,- Prog. Water Technol., vol. 8, 1977, pp 415-509.

DAHAB, M.F. et M.W. LEE, -Nitrat removal from water supplies using biological denitrification, Journal WPCF, vol. 60, no 9, 1988, pp 1670-1674.

DOYLE, Edward et Daniel W. SMITH, -Pilot Plant Investigation of the biological Phosphorus Removal Process,- Présenté: Joint CSCE-ASCE national conference on environmental engineering, 2-4 juillet 1988, pp 328-335.

EKAMA, G.A. et G.v.R. MARAIS, -Carbonacous material removal,- Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes, Water Research Commission, Pretoria, 1984a, pp 4.1-4.20.

EKAMA, G.A. et G.v.R. MARAIS, -Nitrification,- Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes, Water Research Commission, Pretoria, 1984b, pp 5.1-5.18.

EKAMA, G.A. et G.v.R. MARAIS, -Biological nitrogen removal,- Theory, design and operation of nutrient

removal activated sludge processes, Water Research Commission, Pretoria, 1984c, pp 6.1-6.26.

EPA, - Design Manual: Phosphorus removal,- Environmental Protection Agency, janvier 1987, pp 1-54.

EPA, - Summary Report: Sequencing batch reactors,- Environmental Protection Agency, août 1986, pp 1-22.

EPA, -Process design manuel for nitrogen control,- Environmental Protection Agency, Office of Technology Transfert, Cincinnati, Ohio, 1975.

FUHS, G.W. et M. CHEN, -Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater,- Microbial Ecology, vol. 2, 1975, pp 119-138.

IRVINE, Robert L. et Arthur W. BUSCH, - Sequencing batch biological reactors: an overview,- Jourval WPCF, vol. 51, no 2, février 1979, pp 235-243.

LEVIN, G.V. et J. SHAPIRO, -Metabolic uptake of phosphorus by wastewater organisms,- Journal WPCF, vol. 37, 1965, pp 800-821.

MANNING, John F. et Robert L. IRVINE, - The biological removal of phosphorus in a sequencing batch reactor,- Journal WPCF, vol. 57, no 1, janvier 1985, pp 87-94.

McCARTY, P.L., -Phosphorus and nitrogen removal by biological systems,- Proceedings, Wastewater

Reclamation and Reuse Workshop, Lake Tahoe, Californie, Juin 1970.

MELCER, H., W.K. TOPNIK et B.H. SCHMIDTKE, - Conversion of small municipal wastewater treatments plants to sequencing batch reactors-, Journal WPCF, vol. 59, no 2, février 1987, pp 79-85.

MOSER, A., Bioprocess Technology: Kinetics and Reactors, Traduit de l'allemand par P. MANOR, Spriger-Vergag Wien, New York, 1981, 451 p.

OKADA, M. et R. SUDO, - Performance of sequencing batch reactor activated sludge processes for simultaneous removal of nitrogen, phosphorus and BOD as applied to small community sewage treatment,- Water Science Technology, vol. 18, 1986, pp 363-370.

PALIS John C. et Robert L. IRVINE, - Nitrogen removal in a low-loaded single tank sequencing batch reactor,- Journal WPCF, vol. 57, no 1, janvier 1985, pp 82-86.

SHAMMAS, Aazih Kh, - Interations of temperature, pH and biomass on nitrification process,- Journal WPCF, vol. 58, no 1, janvier 1986, pp 52-58.

SILVERSTEIN, JoAnn et E.D. SCHROEDER, - Performance of SBR activated sludge process with nitrification /denitrifica-tion.- Journal WPCF, vol. 55, no 4, avril 1983, pp 377-384.

SIMPKINS, M.J. et A.R. Mc LAREN, -aConsistent Biological Phosphate and Nitrate Removal in an Activated sludge Plant,- Progr. Water Technol., (G.B.), vol. 10, nos 5-6, (1978), p. 433.

SRINATH, E.G., C.A. SASTRY et S.C. PILLAI, -Rapid removal of phosphorus from sewage by activated sludge,- Water and Waste Treatment, vol. 11, 1959, pp 410-.

ZALOUM, R., J. HADJINICOLAOU, D. BELANGER et P. BERGEVIN, - Potentiel de la technologie des réacteurs en discontinu par opérations séquentielles pour le traitement à haute charge,- 8e Symposium sur le traitement des eaux usées, 1985, pp 11-42.

ANNEXE 1: ANALYSES EFFECTUES

Les tests effectués au cours des travaux de laboratoire sont résumés ci-dessous. Tous les tests effectués sont en accord avec la description faite par "Standard Methods"

A1.1 Mesure du carbone

Le carbone est mesuré indirectement par la demande biologique en oxygène (DBO) et par la demande chimique en oxygène (DCO).

Pour des concentrations supérieures à 30 mg/L la précision des mesures est de 5 mg/L, mais elle augmente considerablement pour des concentrations inférieures à 30 mg/L.

A1.2 Mesure de l'azote

L'azote est évalué sous les formes d'ammonium ($N-NH_4^+$) et de nitrates ($N-NO_3^-$) à l'aide de sondes. L'azote total kjeldahl ($N-NH_4^+$ + Norg) est transformé par une digestion acide suivie d'une distillation en $N-NH_4^+$.

L'erreur sur la mesure de $N-NH_4^+$ et $N-NO_3^-$ est de 0.1 mg/L avant dilution. Tous les échantillons pris durant les suivis de cycle étaient dilués par un facteur 2 pour la

mesure de $N\text{-}NH_4^+$ et $N\text{-}NO_3^-$. Les échantillons de NTK sont dilué par un facteur variant de 5 à 15.

A1.3 Mesure du phosphore

Les ortho-phosphates ($P\text{-}PO_4^{3-}$) sont déterminés par coloration au molybdate-vanadate. Les poly-phosphates sont transformés en ortho-phosphates par digestion acide.

La mesure est précise à 0.5 mg/L.

A2.4 Mesure de la biomasse

La biomasse est mesurée par la filtration d'un volume donné de suspension sur un filtre de 1.2 μm. Après séchage du filtre, les solides en suspension (SES) sont déterminés. Après passage au four à à 550°C, on peut évaluer la biomasse comme la fraction de solides qui se vaporisent à cette température, soit les solides volatils en suspension (SVS). La précision sur cette mesure est de 5%.

La qualité de décantation de la biomasse se mesure par rapport à la hauteur d'un voile de boues mesuré après 60 minutes de décantation de 100 ml de liquide mixte dans

un cyclindre gradué. L'indice du volume des boues (IVB) est le volume décanté par masse de SES dans 100 ml.

ANNEXE 2

LE LOGICIEL DE CONTROLE ET D'ACQUISITION DE DONNEES

```
PROGRM Controle_RBS;                                  {etape B}
USES crt, dos;
VAR                                                    {declaration des variables}
   cycletot, nblignes, ncycle, i, j, k                 : Integer;
   v_ctr, x, y, ca, index, delai, high, low            : Integer;
   cycletemoin, fichierplein                           : Integer;
   th, tm, ts, t100                                    : Word;
   dureec, heure0, tempsi, tempsd, tempsd_e            : Real;
   intervalle, memoire, pH, redox, OD, T               : Real;
   touche, reponse, fin                                : Char;
   s, no_e                                             : String[5];
   u, nom                                              : String[12];
   NomFichier                                          : String[20];
   ligne                                               : String[78];
   Fichier, Donnees                                    : Text;
   ouvert                                              : Boolean;
   regs                                                : Registers;
   consigne                                            : array[1..6, 1..2] of real;
   action                                              : array[1..7, 1..2] of real;
   etat                                                : array[1..7]       of integer;
   air                                                 : array[1..4, 1..4] of real;

Procedure Initialisation;
Begin
   dureec:= 6*3600;     heure0:= 0.0;        no_e:= '     ';   ncycle := 4;
   fichierplein:= 200;  ouvert:= false;    fin:= 'N';
   consigne[1,1]:= 5*3600 + 25*60;   consigne[1,2]:= consigne[1,1] + 29.8*60;
   consigne[2,1]:= 0              ;   consigne[2,2]:= consigne[2,1] + 15*60;
   consigne[3,1]:= 4*3600 + 28*60;   consigne[3,2]:= consigne[3,1] +  2*60;
   consigne[4,1]:= 5*3600 + 30*60;   consigne[4,2]:= consigne[4,1] + 29.8*60;
   consigne[5,1]:= 0              ;   consigne[5,2]:= consigne[5,1] + 4.5*3600;
   consigne[6,1]:= 5*3600 + 41*60;   consigne[6,2]:= consigne[6,1] + 18.8*60 ;
   air[1,1]     := 0*3600 + 15*60;   air[1,2]     := 1*3600 + 10*60;
   air[2,1]     := 4*3600 + 0*60 ;   air[2,2]     := 4*3600 + 30*60;
   air[3,1]     := dureec        ;   air[3,2]     := air[3,1] + 30;
   air[1,3] := 35.0;   air[1,4] := 70.0;
   air[2,3] := 50.0;   air[2,4] := 200;     {OD en % de saturation}
   air[3,3] := 50.0;   air[3,4] := 200;
End;

Procedure Curseur_on;
Begin
   with regs do
      begin ax:=$0100; cx:=$0607; end;
   intr(16,regs);
End;
```

```
Procedure Curseur_off;
Begin
   with regs do
      begin ax:=$0100; cx:=$2000; end;
   intr(16,regs);
End;

Function expo(x,y:real):real;
Begin
   expo := exp(y*Ln(abs(x)));
End;

Procedure Print(x,y:integer; text:string);     {x:rangee, y:colonne}
Begin
   GotoXY(y,x);
   Write(text);
End;

Procedure Printr(x,y,a, b:integer; text:real);
Begin
   GotoXY(y,x);
   Write(text:a:b);
End;

Procedure Printi(x,y,text : integer);
Begin
   GotoXY(y,x);
   Write(text);
End;

Function Heure_a : string;                     {lit et transforme l'heure}
Begin                                          {en texte}
   GetTime(th, tm, ts, t100);
   str(th:2,s); u:=s+':';    str(tm:2,s);    u:=u+s+':';
   str(ts:2,s); u:=u+s  ;    Heure_a := u;
End;

Function JourTot : integer;                    {calcule le nb de jours}
Begin                                          { total d'operation}
   If cycletot=0
     then jourtot := 0
     else Jourtot := Trunc(cycletot / ncycle);
End;
```

```
Function Cycle : Integer;                    {determine le cycle avec}
Begin                                        {la partie heure (th)}
   GetTime(th, tm, ts, t100);
   if th >= heure0 + 0*6 then cycle:=1;
   if th >= heure0 + 1*6 then cycle:=2;
   if th >= heure0 + 2*6 then cycle:=3;
   if th >= heure0 + 3*6 then cycle:=4;
   if th < heure0       then cycle:=4;
End;

Function Temps : Real;                       {determine l'heure dans}
VAR tempo:real;                              {chaque cycle}
Begin
   GetTime(th, tm, ts, t100);
   If th>=heure0
      then tempo := (th-dureec/3600*(cycle-1)-heure0)*3600
      else tempo := (th+24-dureec/3600*(cycle-1)-heure0)*3600;
   Temps := tempo + tm*60 + ts + t100/100;
End;

Function Date : string;                      {lit et transforme la}
Var y, m, d, dw : word;                      {date en texte}
Begin
   GetDate(y, m, d, dw);
   str(d:2,s);       u:= s+'.';   str(m:2,s);  u:=u+s+'.';
   str(y-1900:2,s);  u:= u+s;     Date := u;
End;

Function Etape : string;                     {determine l'etape ds le cycle}
Begin
   If temps > consigne[2,1]   then Etape := 'Rempl';
   If temps > air[1,1]        then Etape := 'Rxn a';
   If temps > air[1,2]        then Etape := 'Rxn na';
   If temps > air[2,1]        then Etape := 'Rxn a';
   If temps > consigne[3,1]   then Etape := 'Pu Lm';
   If temps > consigne[3,2]   then Etape := 'Decan';
   If temps > consigne[4,1]   then Etape := 'Pu Su';
End;

Function Conversion_OD (z:real):real;        {canal 0}
Begin                                        {oxygne dissous en %}
   Conversion_OD := 100*(z-420)/(1285-420);  {l'ODmetre =200}
End;

Function Conversion_pH (z:real):real;        {canal 1}
Begin                                        {pH en unites pH}
   Conversion_pH := 7.20 - 0.009523 * z;
End;
```

```
Function Conversion_redox (z:real):real;        {canal 2}
Begin                                           {redox en mV}
   Conversion_redox := 20.00 - 0.19822 * z;
End;

Function Conversion_T (z:real):real;            {canal 3}
Begin                                           {temperature en C}
   Conversion_T := 0.0268699 * z  -  0.771119; {720 < Voltage < 875}
End;

Procedure Donnees_Lire;                         {lit dans le fichier}
Begin                                           {donnees.dat les parametres}
ClrScr;                                         {d'operation du RBS}
   Assign (Donnees, 'C:\TURBO\DONNEES3.DAT');
   Reset (Donnees);
   ReadLn(Donnees, tempsd, cycletot, ca, index);
   ReadLn(Donnees, v_ctr, nblignes, intervalle, cycletemoin);
   For j:= 1 to 7 do begin
      ReadLn(Donnees, etat[j], Action[j,1], Action[j,2]);
   End;
   Close (Donnees);
End;

Procedure Donnees_Ecrire;                       {enregistre dans le fichier}
Begin                                           {donnees.dat les parametres}
   Assign (Donnees, 'C:\TURBO\DONNEES3.DAT');   {d'operation du RBS aux 2 min}
   ReWrite (Donnees);
   WriteLn(Donnees, temps:10:1, cycletot:4, ca:3, index:3);
   WriteLn(Donnees, v_ctr:5, nblignes:5, intervalle:8:1, cycletemoin:3);
   For j:= 1 to 7 do begin
      WriteLn(Donnees, etat[j]:3, Action[j,1]:8:1, Action[j,2]:8:1);
   End;
   Close (Donnees);
End;

Procedure Acquisition;                          {lit les canaux 0,1,2,3}
Var                                             {transforme dans les unites}
   m, n    : integer;                           {desirees et affiche a l'ecran}
   lecture : array [0..3] of real;
   moyenne : real;
Begin
   TextColor(2);
      Print(5,12,date);          Printi(5,62,jourtot);
      Print(6,12,heure_a);       Printi(6,62,cycletot);
      Printi(7,13,cycle);        Printr(7,62,5,2, intervalle); {SECONDES}
   For n:= 0 to 3 do begin
    moyenne := 0;
    m:=n;
```

```
    if n=0 then m:= n+0;
    For k:= 1 to 20 do begin
      Port[1850] := m;              {m: no de canal  +  gain}
      Port[1836] := 0;              {debut de conversion}
      for i:= 1 to 7 do delai:= 0;  {delai de stabilisation}
      high := Port[1844];
      low  := Port[1840];
      lecture[n] := round(256*(high-240) + low) - 2048;
      moyenne := moyenne + lecture[n];
    End;
      lecture[n] := moyenne / 20;
   End;

      OD :=    Conversion_OD (lecture[0]);
      pH :=    Conversion_pH (lecture[1]);
      redox := Conversion_redox (lecture[2]);
      T :=     Conversion_T (lecture[3]);

   TextColor(7);
      Printr(13,21,6,4,temps/3600);            {unites en heures}
      Print(14,21,etape);
      Printi(15,22,v_ctr);
      Printr(16,22,4,1,OD);
      Printr(17,21,5,1,pH);
      Printr(18,21,3,0,redox);
      Printr(19,22,4,1,T);
End;

Procedure Controle;                            {controle l'ouverture et la}
Begin                                          {fermeture des peripheriques}
   For j := 1 to 6 do begin
     If Etat[j] = 0  then begin                {OUVERTURE des pompes et moteurs}
        if ((temps >= consigne[j,1]) and (action[j,1] = 0.0)) then begin
           etat[j] := 1;
           action[j,1] := temps;
           v_ctr := v_ctr + trunc(expo(2,j-1));
           Printr(13+j-1,50,4,2,Action[j,1]/3600);
           Printi(13+j-1, 72, etat[j]);
           Port[1848] := v_ctr;
        end;
     End;
     If Etat[j] = 1  then begin               {FERMETURE des pompes et moteurs}
        if (temps >= consigne[j,2]) then begin
           etat[j] := 0;
           action[j,2] := temps;
           v_ctr := v_ctr - trunc(expo(2,j-1));
           Printr(13+j-1,62,4,2, Action[j,2]/3600);
           Printi(13+j-1,72, etat[j]);
```

```
            Port[1848] := v_ctr;
          end;
        End;
      End;
      If etat[7] = 0 then begin                    {AERATION du RBS}
         if temps >= air[ca,2] then begin          {vanne N/C vers le RBS}
            ca := ca + 1;                          {vanne N/O vers l'atm}
            Printr(19,62,4,2, temps/3600);
            Printi(19,72,etat[7]);
         end;
         if ((temps >= air[ca,1]) and (OD <= air[ca,3])) then begin
            v_ctr := v_ctr + 192;
            etat[7] := 1;
            Action[7,1] := temps;
            Printr(19,50,4,2, Action[7,1]/3600);
            Printi(19,72, etat[7]);
            Port[1848] := v_ctr;
         end;
      End;
      IF etat[7] = 1 then begin                    {ARRET DE L'AERATION du RBS}
         if ((temps < air[ca,2]) and (OD >= air[ca,4])) then begin
            v_ctr := v_ctr - 192;
            etat[7] := 0;
            Action[7,2] := temps;
            Printi(19,72,etat[7]);
            Port[1848] := v_ctr;
         end;
         if temps >= air[ca,2] then begin
            ca := ca + 1;
            v_ctr := v_ctr - 192;
            etat[7] := 0;
            Action[7,2] := temps;
            Printr(19,62,4,2, Action[7,2]/3600);
            Printi(19,72, etat[7]);
            Port[1848] := v_ctr;
         end;
      End;
   End;

   Function Nom_Fichier : String;
   VAR                                           {determine le nom du fichier}
      ext2, ext1: string[3];                     {d'acquisition a partir du}
   Begin                                         {nb total de cycles effectues}
      Str (cycletot , ext1);                     {depuis le depart du RBS et}
      Str (index , ext2);                        {d'un index}
      Nom_Fichier := 'c:\RBS\A3_' + ext1 + '_' + ext2 ;   {sous dir: c:\rbs}
   End;
```

```
Procedure Repertoire;                          {demande a l'operateur le}
Var                                            {fichier qui sera manipule}
   RBS : SearchRec;
Begin
   ClrScr;
   ChDir('c:\rbs');
   FindFirst('*.*',$10,RBS);
   While DosError = 0 do begin
      WriteLn(RBS.name);
      FindNext(RBS);
   end;
   WriteLn('Sur quel fichier désirez-vous apporter des modifications?');
   ReadLn(nom);
   ChDir('c:\turbo');
End;

Procedure Debut_Cycle;                         {initialisation de certains}
Begin                                          {parametres pour reprendre}
   for j:= 1 to 7 do begin                     {un nouveau cycle}
      Print(13+j-1, 50, '     ');
      Print(13+j-1, 62, '     ');
      Action[j,1] := 0.0;
      Action[j,2] := 0.0;
   end;
   ca := 1;  cycletot := cycletot + 1;  cycletemoin := cycle;
   tempsi := -intervalle;   tempsd_e :=0;
End;

Procedure Ouv_Fichier;                         {ouvre le fichier}
Begin                                          {d'acquisition de donnees}
   NomFichier := Nom_Fichier;      Print(23,27,NomFichier);
   Assign(Fichier, NomFichier);
   ReWrite(Fichier);   ouvert := true;
   WriteLn(Fichier,'Fichier d''acquisition: ',NomFichier);
   WriteLn(Fichier);
   Write(Fichier,cycletot:3,'Date:':7,Date:7);
   Write(Fichier,'Cycle:':7,Cycle:7, 'J.tot:':7, jourtot:7);
   WriteLn(Fichier);
   Write(Fichier,'   ', 'Temps':7, 'OD':7, 'pH':7, 'rédox':7, 'T':7);
   Write(Fichier,'Etape':7,'P1':3,'P2':3, 'P3':3, 'P4':3, 'M1':3);
   Write(Fichier,'M2':3, 'VA':3, 'V':3, 'ech':5);
   WriteLn(Fichier);
   nblignes := 7;
   Close(Fichier);     ouvert := false;
End;
```

```
Procedure Ecrire_Fichier;                          {ecrit sur le fichier}
Begin                                              {d'acquisition de donnees}
   Assign(Fichier, NomFichier);
   Append(Fichier);    ouvert := true;
   Write(Fichier,'   ',Temps/3600:7:4, OD:7:1, pH:7:1, redox:7:0, T:7:1);
   Write(Fichier,etape:7,etat[1]:3,etat[2]:3,etat[3]:3,etat[4]:3,etat[5]:3);
   Write(Fichier,etat[6]:3,etat[7]:3,v_ctr:5,no_e:6); no_e := '      ';
   WriteLn(Fichier);
   nblignes := nblignes + 1;
   Close(Fichier);     ouvert := false;
End;

Procedure Sauver_Fichier;                          {transcrit un fichier du}
Var                                                {disque dur vers une disquette}
   disque: string[1];
   FichierL, FichierE : Text;
   FichierLire, FichierEcrire : String[20];
Begin
   WriteLn('Impression sur disque "A" ou "B" ?');    ReadLn(disque);
   FichierLire := 'c:\RBS\' + nom;   FichierEcrire:= disque + ':' + nom;
   Assign(FichierL, FichierLire);    Assign(FichierE, FichierEcrire);
   Reset(FichierL);                  ReWrite(FichierE);
   While not EOF(FichierL) do Begin
      ReadLn(FichierL, ligne);
      WriteLn(FichierE, ligne);
   end;
   Close(FichierL);                  Close(FichierE);
End;

Procedure Afficher_Fichier;                        {affiche le contenu d'un}
Var                                                {fichier a l'ecran}
   FichierL : Text;
   FichierLire : String[20];
   position : integer;
   bidon : char;
Begin
   ClrScr;
   Repertoire;
   FichierLire := 'c:\RBS\' + nom;
   Assign(FichierL, FichierLire);
   Reset(FichierL); ClrScr; position:=1;
   While not EOF(FichierL) do Begin
      ReadLn(FichierL, ligne);
      Print(position,1,ligne);
      position := position + 1;
      If position=22 then begin
         Print(position+2,20,'PRESSEZ UNE TOUCHE POUR CONTINUER');
         Bidon:=ReadKey;  ClrScr;  position:=1;
```

```
      End;
   End;
   Close(FichierL);
   Print(position+2,20,'PRESSEZ UNE TOUCHER POUR CONTINUER');
   bidon:=readkey;   WriteLn;

End;

Procedure Effacer_Fichier;                    {efface un fichier sur}
Var                                           {le disque dur}
   FichierEf : Text;
   FichierEffacer : String[20];
Begin
   ClrScr;
   Repertoire;
   FichierEffacer := 'c:\RBS\' + nom;
   WriteLn('Vous voulez effacer le fichier: ', FichierEffacer);
   reponse := UpCase(Readkey);
   If reponse = 'O' then Begin
       Assign(FichierEf, FichierEffacer);
       ERASE(FichierEf);
   End;
End;

Procedure Calibration;                        {lit les canaux d'acqui. pour}
Var                                           {faire la calibr. des sondes}
   m, n, canal, moyenne, impression, gain: integer;
   voltage, valeur, total: real;
   FichierC              : text;
   FichierCalibration, sonde: String[20];
   Poursuite             : char;
Begin
   Curseur_on;
   Print(24,5,' SONDE A CALIBRER (OD, pH, redox, T) ?'); Readln(sonde);
   ClrScr; TextBackGround(1); TextColor(15);
   Print(2,28, 'Calibration de la sonde a ');
   Print(2,55, sonde);
   Print(4,10, 'No de canal: 0-Od, 1-pH, 2-redox, 3-T: '); Readln(canal);
   Print(5,10, 'Nom du fichier pour sauver les donnes?');
   ReadLn(FichierCalibration);
   Assign(FichierC, FichierCalibration);
   Rewrite(FichierC);
   WriteLn(FichierC, 'Calibration de la sonde a ',sonde);
   WriteLn(FichierC, 'Voltage   Valeur');
   WriteLn(FichierC);
   Repeat
      Print(6,10,'Combien d''acquisitions doivent servir a faire la moyenne? ');
      ReadLn(moyenne);
```

```
      Print(7,10,'Valeur de la sonde calibree? ');  REadLn(valeur);
      Print(8,10, 'Combien d''impressions sur le fichier? '); ReadLn(impression);
      Print(9,10, 'Valeur du gain: 0, 16, 32, 64? '); ReadLn(gain);
      total := 0;
      For m:=1 to impression do begin
         voltage := 0;
      For n:=1 to moyenne do begin
         Port[1850] := canal + gain;
         Port[1836] := 0;
         for i:= 1 to 7 do delai:=0;
         high := Port[1844];
         low  := Port[1840];
         voltage := voltage + round(256*(high-240) + low)-2048;
      End;
      voltage := voltage/moyenne;
      total := total + voltage;
      Printr(10+m,25,9,1, voltage);
      PRintr(10+m,45,9,2, valeur);
      WriteLn(FichierC, voltage:9:1, valeur:9:2, gain:6);
      End;
      Printr(23,25,9,1,total/impression);
      Print(25,10, 'Poursuite de la calibration (o/n)?');
      poursuite := upcase(readkey);
   Until (poursuite = 'N');
   Close(FichierC);
   Curseur_off;
End;

Procedure QO2x_Kla;                          {ferme l'aeration et prend en}
Var                                          {note sur un fichier l'OD, et}
   delta_tQ, delta_tK, temps_sauver  : real;  {remets l'aeration et note OD}
   ODmin, ODmax, lecture, moyenne, temps0: real;
   Nomfichier_QK                        : string[20];
   fichier_QK                           : text;
   disquette                            : char;

Function OD_QK : real;
Begin
   lecture := 0;
   For k:=1 to 5 do begin
      Port[1850] := 0;
      Port[1836] := 0;
      for i:= 1 to 7 do delai :=0;
      high := Port[1844];
      low  := Port[1840];
      lecture := lecture + round(256*(high-240)+low) -2048;
   end;
   lecture := lecture/5;
   OD_QK := conversion_OD(lecture);
```

```
End;

Function t : real;
Begin
   t := temps - temps0;
End;

Begin
   ClrScr;  Curseur_on;
   Print(3,25,'Mesure du QO2x et du Kla (OUR/OTR)');
   Print(5,10,'Nom du fichier d''acquisition(8 lettres max.? ');
   ReadLn(Nomfichier_QK);
   Print(6,10,'Intervalle d''acq. (sec) pour la mesure du QO2x? ');
   ReadLn(delta_tQ);
   Print(7,10,'Intervalle d''acq. (sec) pour la mesure du Kla? ');
   ReadLn(delta_tK);
   Print(8,10,'Conc. minimale de l''oxygene dissous? '); ReadLn(ODmin);
   Print(9,10,'Conc. maximale de l''oxygene dissous? '); ReadLn(ODmax);
   Repeat
      Print(11,10,'                                                  ');
      Print(11,10,'Avez-vous une disquette dans le lecteur B? ');
      disquette := upcase(readkey);
   Until disquette= 'O';
   Print(14,20,'--- Mesure du QO2x ---');
   Print(16,20,'temps (sec)');
   Print(16,35,'OD (%)');
   Curseur_off;
   temps0 := temps;
   temps_sauver := -delta_tQ;
   Assign(fichier_QK, 'c:\rbs\' + Nomfichier_QK + '.QK');
   Rewrite(fichier_QK);
   WriteLn(fichier_QK, Nomfichier_QK);
   WriteLn(fichier_QK, '--- MESURE DU QO2X ---');
   WriteLn(fichier_QK); WriteLn(fichier_QK, 'temps':9, 'OD':9);
   v_ctr := v_ctr + 192;
   Port[1848] := v_ctr;
   Repeat
      Printr(18,17,8,2,t);   Printr(18,32,8,2,OD_QK);
      if (t-temps_sauver >= delta_tQ) then begin
         temps_sauver := t;
         WriteLn(fichier_QK, t:9:2, OD_QK:9:2);
      end;
   Until (OD_QK <= ODmin);
   Close(fichier_QK);
   Assign(fichier_QK, 'c:\rbs\' + Nomfichier_QK + '.QK');
   Append(fichier_QK);
   WriteLn(fichier_QK);
   Print(14,20, '--- MESURE DU KLA ---');
```

```
   WriteLn(fichier_QK, '--- MESURE DU KLA ---');
   temps_sauver := -delta_tK;
   v_ctr := v_ctr - 192;
   Port[1848] := v_ctr;
   Repeat
      Printr(18,17,8,2,t);   Printr(18,32,8,2,OD_QK);
      if (t-temps_sauver >= delta_tK) then begin
         temps_sauver := t;
         WriteLn(fichier_QK, t:9:2, OD_QK:9:2);
      end;
   Until (OD_QK >= ODmax);
   Close(fichier_QK);
   Print(20,10,' ');
   Nom := Nomfichier_QK + '.QK';  Sauver_Fichier;
End;

Procedure Ecran_de_base;                        {trace les contours, les}
Begin                                           {tableaux et les textes}
   TextBackGround(1); ClrScr;                   {permanents a l'ecran}
   TextColor(15);
     Print(3,12,'SYSTEME D''OPERATION D''UN Réacteur Biologique Séquentiel');

   TextColor(5);
     Print(5,4,'Date: ');   Print(6,4,'Heure: ');   Print(7,4,'Cycle: ');
     Print(5,32,'Nombre de jours d''opération: ');
     Print(6,32,'Nombre de cycles effectués: ');
     Print(7,32,'Intervalle d''acquisition: ');     Print(7,69,'secondes');

   TextColor(15);
     Print(9,6,'ACQUISITION DE DONNEES');
     Print(9,40,'CONTROLE DES PERIPHERIQUES');
     Print(11,7,'Acquisition');
     Print(11,21,'Valeur');
     Print(11,32,'Périphérique');
     Print(11,47,'Ouverture');
     Print(11,59,'Fermeture');
     Print(11,71,'Etat');
     Print(23,3,'Fichier d''acquisition:');
     Print(23,53,'AIDE-MEMOIRE: TOUCHE "A"');

   TextColor(7);
     Print(13,7,'Temps (h)');        Print(13,34,'Pompe 1');
     Print(14,7,'Etape');            Print(14,34,'Pompe 2');
     Print(15,7,'V contr');          Print(15,34,'Pompe 3');
     Print(16,7,'Oxygène (%)');      Print(16,34,'Pompe 4');
     Print(17,7,'pH');               Print(17,34,'Moteur 1');
     Print(18,7,'Rédox (mV)');       Print(18,34,'Moteur 2');
     Print(19,7,'Température');  Print(19,33,'Vanne d''air');
```

```
   TextColor(2);
     Print(10,5,'┌');   Print(10,28,'┐');      {tableau d'ACQUISITION}
     Print(20,5,'└');   Print(20,28,'┘');
     For x:= 6 to 27 do Begin
       Print(10,x,'-'); Print(20,x,'-');   Print(12,x,'-');    End;
     Print(10,19,'┬');
     Print(20,19,'┴');
     For y:= 11 to 19 do Begin
        Print(y,5,'|'); Print(y,19,'|'); Print(y,28,'|');      End;

     Print(10,30,'┌');  Print(10,76,'┐');      {tableau de CONTROLE}
     Print(20,30,'└');  Print(20,76,'┘');
     For x:= 31 to 75 do Begin
       Print(10,x,'-'); Print(20,x,'-');   Print(12,x,'-');    End;
     Print(10,45,'┬');  Print(10,57,'┬');  Print(10,69,'┬');
     Print(20,45,'┴');  Print(20,57,'┴');  Print(20,69,'┴');
     For y:= 11 to 19 do Begin
        Print(y,30,'|'); Print(y,45,'|'); Print(y,57,'|');
        Print(y,69,'|'); Print(y,76,'|');
     End;

   TextBackGround(2);
     For x:= 1 to 80 do Begin Print(1,x,' ');   Print(24,x,' ');  End;
     For y:= 1 to 24 do Begin Print(y,1, '  '); Print(y,79,'  '); End;
     TextBackGround(1); TextColor(7);
End;

Procedure Retour;                              {revient a l'ecran de base}
Begin                                          {et inscrit les valeurs}
   Ecran_de_base;                              {dans les tableaux}
   For i:= 1 to 7 do begin
      If Action[i,1] = 0.0
         then Print(13+i-1, 50, '    ')
         else Printr(13+i-1,50,4,2, Action[i,1]/3600);
      If Action[i,2] = 0.0
         then Print(13+i-1, 62, '    ')
         else Printr(13+i-1,62,4,2, Action[i,2]/3600);
      Printi(13+i-1,72, etat[i]);
   End;
   Print(23,27, NomFichier);
End;

Procedure Aide_memoire;                        {texte aide-memoire}
Begin
   ClrScr;  TextBackGround(1);  TextColor(15);
   Print(3,34,'AIDE-MEMOIRE');
   Print(5,5, 'A: Aide-memoire');
   Print(6,5, 'B: Espace memoire disponible sur le disque C');
```

```
   Print(7,5, 'C: Calibration des sondes');
   Print(8,5, 'E: Effacer un fichier d''acquisition');
   Print(9,5, 'F: Arret temporaire du programme');
   Print(11,5,'I: Choix d''un nouvel intervalle d''acquisition');
   Print(12,5,'L: Lire un fichier d''acquisition a l''ecran');
   Print(13,5,'M: Action manuelle des peripheriques');
   Print(14,5,'P: Prise d''echantillon');
   Print(15,5,'Q: Mesure du QO2x et du Kla (OUR/OTR)');
   Print(16,5,'R: Retour a l''ecran de base');
   Print(17,5,'S: Sauver un fichier d''acquisition sur disquette (A ou B)');
   Print(23,12, 'PRESSEZ UNE TOUCHE POUR REVENIR AU PROGRAMME PRINCIPAL');
   Repeat Until KeyPressed;
End;
                                                {PROGRAMME PRINCIPAL}
BEGIN                                           {appelle les procedures}

   TextBackGround(1); TextColor(15); ClrScr;
   Initialisation;    Curseur_off;
   Donnees_lire;
   Port[1851] := 128;
   Port[1848] := v_ctr;
   Retour;     index:= index+1;     tempsi:= -intervalle;
   Ouv_Fichier;
   REPEAT
   Repeat
      Acquisition;
      Controle;
      If (temps-tempsd_e >= 120) then begin
         tempsd_e := temps;
         Donnees_Ecrire;
      End;
      If (temps-tempsi >= intervalle) then begin
         tempsi := temps;
         Ecrire_Fichier;
      End;
      If (cycle <> cycletemoin) then begin
         Debut_Cycle;
         if (nblignes + trunc(dureec/intervalle)) > fichierplein then begin
            index:=1;
            Ouv_Fichier;
         end;
      End;
   Until KeyPressed;
   touche := UpCase(readkey);
   Case touche of
      'A' : begin Aide_Memoire; Retour; end;
      'B' : begin Print(25,5,'Espace memoire libre sur le disque C: ');
            Print(25,53,'Kbytes'); memoire:=DiskFree(3)/1000;
            Printr(25,43,8,1,memoire); end;
```

```
      'C' : begin Calibration; Retour; end;
      'E' : begin Effacer_Fichier; Retour; end;
      'F' : fin:='O';
      'I' : begin Print(25,5,'Nouvel intervalle d''acquisition (en secondes) ?')
            ;  ReadLn(intervalle); Retour; end;
      'L' : begin Repeat Afficher_Fichier;
            WriteLn('Voulez-vous lire un autre fichier?');
            reponse:=upcase(readkey); Until(reponse <> 'O');   Retour; end;
      'M' : begin Print(25,10,'Valeur du vecteur de controle');
            readln(v_ctr); Port[1848]:=v_ctr; Retour; end;
      'P' : begin Print(25,5,'No echantillon - lieu (max 5 lettres): ');
            ReadLn(no_e); Retour; end;
      'Q' : begin QO2X_Kla;  Retour; end;
      'R' : Retour;
      'S' : begin Repeat Repertoire; Sauver_Fichier;
            WriteLn('Voulez-vous sauver un autre fichier?');
            reponse:=upcase(readkey); Until(reponse<>'O'); Retour; end;
      End;
   UNTIL (FIN = 'O');
   If ouvert=true then Close(Fichier);
   Curseur_on; donnees_ecrire;
   Print(24,10,'Valeur du vecteur de controle?');
   Printi(24,60,v_ctr);
END.→
```

ANNEXE 3

RESULTATS D'ANALYSE RECUEILLIES AU COURS DES 3 ETAPES: AFFLUENT, EFFLUENT, LIQUIDE MIXTE

Tableau A3.1: Affluent, Etape A

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	NTK (mg/L)
58	208				4.7	13.9
78	203					8.9
108		162	25	15		
117	202		234	185		
146	190				8.1	14.8
166	401	151	187	113	7.9	24.4
186		117				
194	201				4.3	18.6
202	298	90	128	66		
214	337	66	231	104	7.3	14.6
230	259	132	91	56		
246	73	37	31	15	4.5	
258	143	92	39	29		9.2
270	273	76				
274	181	144	26	23	5.5	
286	180	135	26	25	5.4	31.4
290	75	55	10	10	2.1	7
MOYENNE:	214.93	104.75	93.45	58.27	5.53	15.87
E-TYPE:	85.71	39.30	83.25	52.65	1.84	7.45

Tableau A3.2: Effluent, Etape A

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	NTK (mg/L)
58	3		27	17	5	0.3
78	15					0.1
108	51	30	26	23	1.6	
117	47		19	14		
146	95				5.5	3.4
166	62	46	21	20	3.8	1.9
186		63	16	9		
194	53				3.2	0.6
202	53	50	26	19		
214	55	48	15	11	2.2	0.2
230	46	38	9	8		
246	43	29	16	6	1.2	
258	57	24	15	9		0.6
270	12					
274	100		22	19	5.9	
286	35	16	17	13	4.4	1.6
290		22	13	9	1.5	1
MOYENNE:	48.47	36.60	18.62	13.62	3.43	1.08
E-TYPE:	25.70	14.12	5.28	5.26	1.66	1.01

Tableau A3.3: Liquide mixte, Etape A

CYCLE	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	IVB (ml/g)	TRC (jours)	P/SES (%)	P/SVS (%)	N/SES (%)	N/SVS (%)
58	407	213	172	4.8				
78								
108	1350	870		9.5	3.65	5.68		
117	809	494		9.2				
146								
166	1259	773	119	9.6	3.5	5.8	4.80	7.81
186	1947	1057	92	14.3				
194	2053	1153		18.8	2.6	4.8		
202	2160	1249	144	12.1				
214	2083	1211	125	14.1	A	A	3.02	5.20
230	1866	1056	241	14.7				
246	2698	1517	182	16.4	2.4	4.2		
258	1956	955	158	14.0			2.66	5.45
270								
274	1414	900	127	10.6	3.1	5.1		
286	1658	1047	139	12.9	3.2	5.1	4.22	6.69
290	1900	1100		14.4		2.73		
MOYENNE:	1682.86	971.07	149.90	12.52	2.64	4.18	3.68	6.29
E-TYPE:	569.16	311.67	39.36	3.40	1.15	1.82	0.87	1.05

Tableau A3.4: Affluent, Etape B

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	DBOu tot (mg/L)	DBOu sol (mg/L)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
58	72	38							7.4	1.2
74										
75	75	55	44	27.5			1.9	2.1	7.0	1.0
82	65	51			10	10		2.1	9.8	1.0
87	265	207						3.6	23.3	1.8
98										
99	282	200						12.6	14.8	1.2
102										
103		129	96.5	87.5			6.4	8.6	10.8	1.0
111										
112	126	64						2.1	15.4	1.2
114	74	80						3.5	16.4	1.0
130										
131	137	62	60	30			1.6	2.3	11.4	3.8
134										
138		50						1.5	18.3	1.2
141	244	200						4.0	30.0	0.8
155	135	51						1.5	23.3	0.7
158	173	136						4.1	38.0	0.8
162	167	137						4.3	37.0	0.8
167	162	141						3.6	25.0	1.0
170										
171	200	140			48	16		3.9	14.6	1
186										
187	171	144	117.7	98.8				3.6	20.4	1.2
195										
196	210	149						4.0	15.6	0.8
198	196	136						3.5	16.0	0.8
214		148	100.2					5.2	14.0	0.8
226										
227	196	126						6.9	14.2	1.4
241	66	35						0.6	5.2	4.0
250		28	29.9	11				0.9	4.8	2.0
273	57	42						0.6	5.6	1
277										
281	140	129						4.2	6.2	1.6
305	126	114						5.1	9.4	1
309	188	99						5.3	3.6	2
325	165	151						1.8	8.8	2.4
333	141	138			16	15		2.1	11.4	1
MOYENNE:	153.32	110.77	74.72	50.96	23.60	15.00	3.30	4.13	14.89	1.35
E-TYPE:	61.56	51.44	31.99	35.24	13.94	3.63	2.20	3.33	8.78	0.79

Tableau A3.5: Effluent, Etape B

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	DBOu (mg/L)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
58	15	21					0.8	0.2	11.8
74		13					1.5	0.6	7.8
75	24	12	1		9	1.5	1.5	0.2	1.0
82	28	28		13	9		1.7	0.6	1.3
87	6	7					1.6	0.4	9.2
98	45	36					2.9	0.2	17.6
99									
102		20					4.8	0.2	5.8
103		19	2		7	3.1	5.1	0.2	10.2
111	13	20					4.3	0.2	8.0
112									
114	29	19						0.4	9.8
130		17					2.4	0.2	14.6
131	25	17	1		9	1.6	2.3	0.2	15.0
134				9	9				
138	26	25					1.5	1.2	15.0
141	30	34					1.4	0.5	16.5
155	35	19					2.6	0.5	20.5
158	23	24					2.4	0.3	19.5
162	22	22					2.6	0.3	19.5
167		33					2.9	0.2	15.0
170	17	17		5	1		2.5	0.2	19.6
171					9				
186								0.2	16.2
187	26	26	2		9		3.3	0.2	16.2
195	32	25					3.0	0.1	16.4
196									
198	25	11					3.4	0.1	7.0
214		23			9	3.3	3.6	0.1	3.8
226	47	28	3				0.8	0.2	6.0
227									
241	38	41					1.9	0.2	9.4
250		14	1.5		9	0.9	1.1	0.2	7.8
273	43	32					0.8	0.7	1
277	27	32					0.5	0.7	7.2
281	27	15					2.5	0.4	6.8
305	26	15					3.5	0.2	3.4
309	13	12					6.3	0.2	4.6
325	17	15					1.6	0.4	5.0
333	24.0	22		5	4		1	0.2	4.6
MOYENNE:	26.27	21.32	1.75	7.60	7.50	2.08	2.76	0.31	10.12
E-TYPE:	9.68	8.02	0.69	3.07	2.50	0.95	2.23	0.22	6.00

Tableau A3.6: Liquide mixte, Etape B

CYCLE	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	IVB (ml/g)	Ptot (mg/L)	P/SES (%)	TRC (jours)
58						
74						
75	1907	1083		52	2.73	17.8
82	1920	1100	94			17.8
87						
98						
99						
102						
103	1950	1159		44		19.3
111						
112						
114						
130						
131	1985	1235		50	2.52	18.4
134	2050	1310	88			18.7
138						
141						
155						
158						
162						
167						
170						
171	2000	820	100			16.3
186						
187	2420	1475	61			19.2
195						
196						
198						
214	2278	1390		51	2.24	19.0
226						
227						
241						
250	1733	1060		41	2.37	17.7
273						
277						
281						
305						
309						
325						
333	1893	1011	132			20.9
MOYENNE:	2088.00	1227.45	110.33	47.60	2.46	18.79
E-TYPE:	295.99	265.63	40.11	4.32	0.18	1.44

Tableau A3.7: Affluent, Etape C

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	DBOu tot (mg/L)	DBOu sol (mg/L)	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	P-PO4 (mg/L)	NTK (mg/L)	N-NH4 (mg/L)	N-NO3 (mg/L)
11	330	170	124	57	118	73					
20	182	150			35	26		4.5	28.0	27.4	6.0
23	322	115			163	108	7.6				4.6
27	258	177			79	55	6.8		24.8	24.0	5.7
39	258	124			108	66	4.2	4.1	35.4	29.2	8.1
55	158	110	55	49	29	23	5.1	5.1	32.0	31.7	8.5
67	364	143			151	86	8.9	6.6	39.0	30.5	4.9
83	127	71			29	21	3.9	3.9	33.2	30.5	0.6
91	100	76	20	24.5	17	12	3.6	3.6	28.6	27.6	4.3
111					42	25			17.8	11.9	2.3
123	229	81	110	27.5	179	103	7.5	1.7	25.2	20.5	1.1
128		83	27.5		95	54	5.6	2.4	36.0	28.0	1.0
135	281	55						2.6			
139	101	68			40	26	3.0	2.8			
151	100	54	54	33	53	37	5.5	3.0	23.4	21.7	0.8
163											
167	91	57			33	20	2.0	1.8	14.8	10.2	0.9
179	48	24			11	10	1.6		9.4	7.2	2.1
192											
207	46	33						2.2		8.5	0.6
219	87	79			23	17		1.9		4.2	0.8
223	47	34						1.2		2.6	4.6
235	42	28			18	14	1.9	1.3	6.2	6.0	3.6
247											
248	170	77	69	48	81	48		1.8			
252	89	63						1.7			
263	67	42			33	20	2.7	2.2			
276		110						6.4		10.6	1.4
311	150	107			37	24		1.5		8.5	
316		120					9.7	9.7		27.6	1.2
399	168	90						3.3			
404		145					17.4	17.4		39.2	1.4
419	83	65						7.0			
428		190					6.0	6.0		20.0	1.0
11-135											
MOYENNE:	237.18	104.23	67.30	39.50	87.08	54.33	5.91	3.83	30.00	26.13	4.28
E-TYPE:	82.58	47.99	42.45	13.83	54.94	32.00	1.77	1.41	6.04	5.70	2.63
136-316											
MOYENNE:	86.50	64.00	61.50	40.50	36.58	24.00	3.77	2.88	13.45	10.71	1.78
E-TYPE:	39.23	30.36	7.50	7.50	19.62	11.19	2.71	2.35	6.52	7.47	1.33

Tableau A3.8: Effluent, Etape C

CYCLE	DCO tot (mg/L)	DCO sol (mg/L)	DBOu	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	Ptot (mg/L)	P-PO4	NTK (mg/L)	N-NH4	N-NO3
11	49	40	10	9	7					
20	33	24		11	9		2.4	4.0	0.4	28.4
23	31	16		16	12	2.7			0.6	25.8
27	47	27		8	8	3.1		2.2	0.3	20.0
39	33	23		15	11	2.6	2.3	1.4	0.1	21.0
55	43	25	4.9	16	12	2.9	2.6	1.8	1.0	35.4
67	49	39		14	10	2.4	2.4	4.2	0.2	21.2
83	36	32		8	7	2.2	2.0	3.2	0.5	14.1
91	20	18	0	9	6	2.2	2.2	1.6	1.0	34.9
111				23	14			4.6	0.4	14.1
123	73	44	12.5	34	20	3.0	1.5	5.8	0.1	20.3
128		36		34	19	1.1	1.3	8.4	0.4	23.0
135	52	27				2.6	1.7			
139	62	37		46	25	3.2	2.0			
151	37	16	8	38	21	4.0	1.8	5.6	0.6	16.9
163	38	19		17	11	2.0	1.7	2.8	0.2	18.0
167	27	19		16	7	1.8	1.3	2.8	0.3	10.9
179	16	4		15	11	1.8		2.6	0.2	8.4
192	31	21					0.9		0.3	3.0
207	41	16					1.6		6.3	3.2
219	26	14		13	10		0.9		0.2	2.7
223	15	8					0.8		0.3	5.3
235	27	7		14	12	1.9	1.3	2.6	0.7	9.0
247	20	8	2.5	6	5		0.6			
248										
252	28	17					0.3			
263	25	19		11	9	2.3	1.7			
276		18			5		5.3		0.8	5.3
311	22	19		1	1		0.2		0.2	
316		38			16	0.2	0.2		8.0	2.8
399	38	36					2.1			
404		17			2	11.2	11.2		2.8	22.2
419		29					6.1			
428		4			8	4.6	4.6		1.8	6.2
11-135										
MOYENNE:	38.83	27.00	6.85	16.42	11.25	2.48	2.04	3.72	0.45	23.47
E-TYPE:	17.40	11.33	4.81	8.90	4.34	0.55	0.42	2.08	0.30	6.82
136-316										
MOYENNE:	29.64	17.50	5.25	17.70	11.08	2.15	1.37	3.28	1.51	7.13
E-TYPE:	11.67	9.06	2.75	13.12	6.55	1.04	1.20	1.16	2.55	5.49

Tableau A3.9: Liquide mixte, Etape C

CYCLE	SES (mg/L)	SVS (mg/L)	IVB (ml/g)	P/SES (%)	TRC (jours)
11	2250	1500			18.4
20	2520	1600			17.8
23	2360	1407	161		16.1
27	2500	1460	188		17.8
39	2480	1655	235		17.1
55	2430	1655	235		16.8
67	2145	1350	210		16.7
83	2420	1420	215		18.2
91	2690	1570	186		18.9
111	2870	1720	192		16.3
123	3180	1880	214	3.8	15.1
128	3040	1670			14.8
135					
139	3390	1930	206		14.2
151	3160	1790	196		14.6
163	2415	1245	248		16.0
167	1890	1010	222	2.64	17.0
179	1390	870	122		14.3
192					
207				2.71	
219	1510	890	166		14.9
223				3.08	
235	335	250	507		7.2
247	1245	725	185		17.0
248					
252					
263	1170	950	162		15.7
276	1170	670			16.7
311					
316	1090	690			11.0
399					
404	1802	1099		5.76	20.5
419					
428	2254	1375			17.6
11-135					
MOYENNE:	2573.75	1573.92	204.00	3.80	17.01
E-TYPE:	300.27	146.70	22.98	0.00	1.23
136-316					
MOYENNE:	1705.91	1001.82	223.78	2.81	14.41
E-TYPE:	887.85	469.40	105.89	0.19	2.80

ANNEXE 4

PHOTOS PRISES AU MICROSCOPE

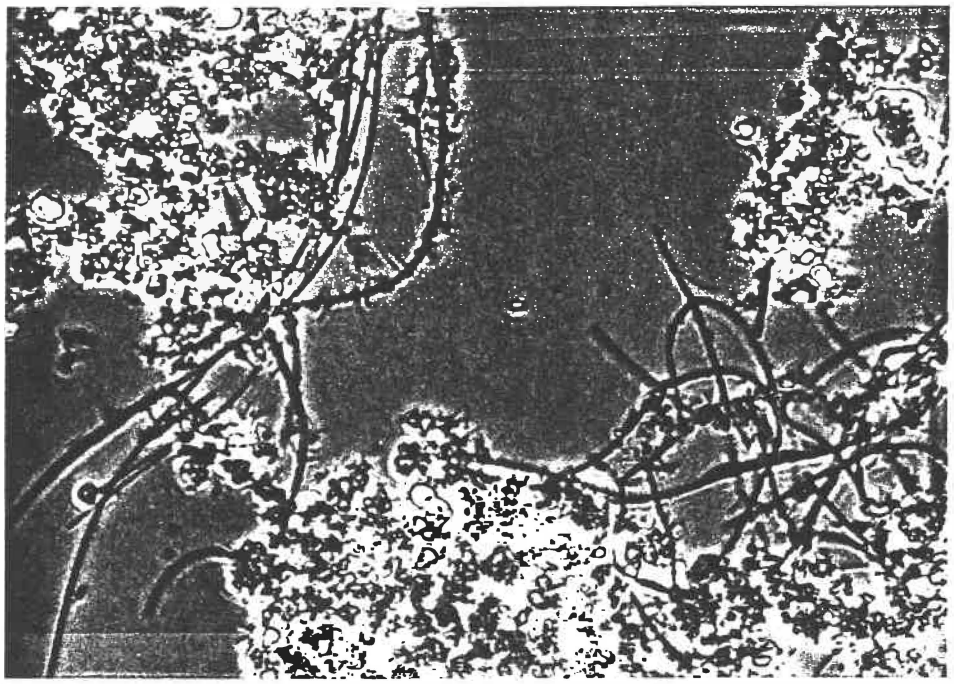


Figure A4.1: Bactéries filamenteuses, Type 1701

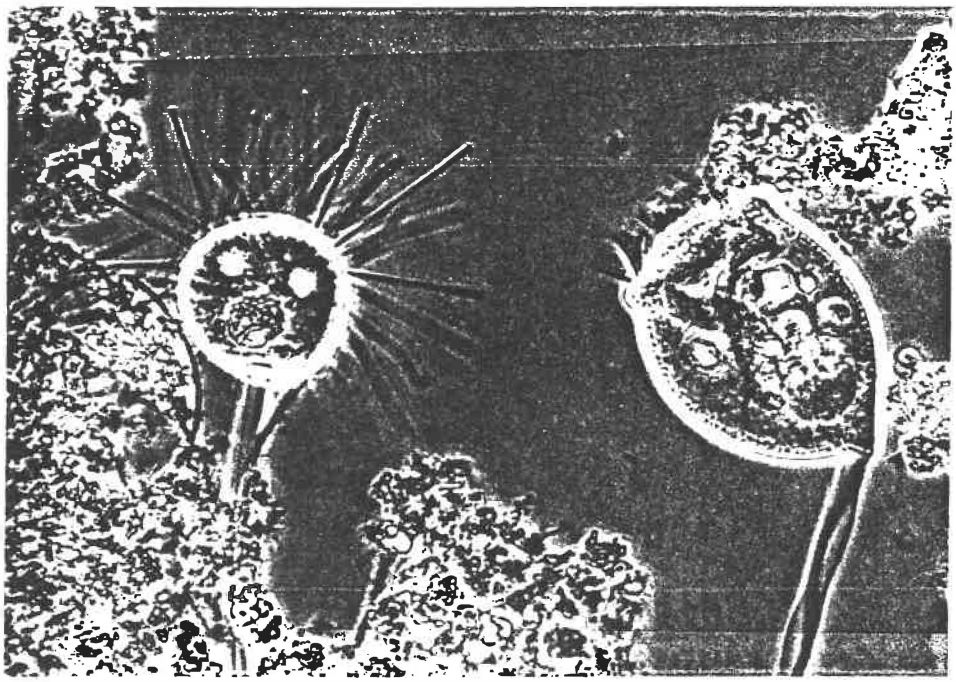


Figure A4.2: Protozoaires, "Ciliés pertriches", *Suctoria*

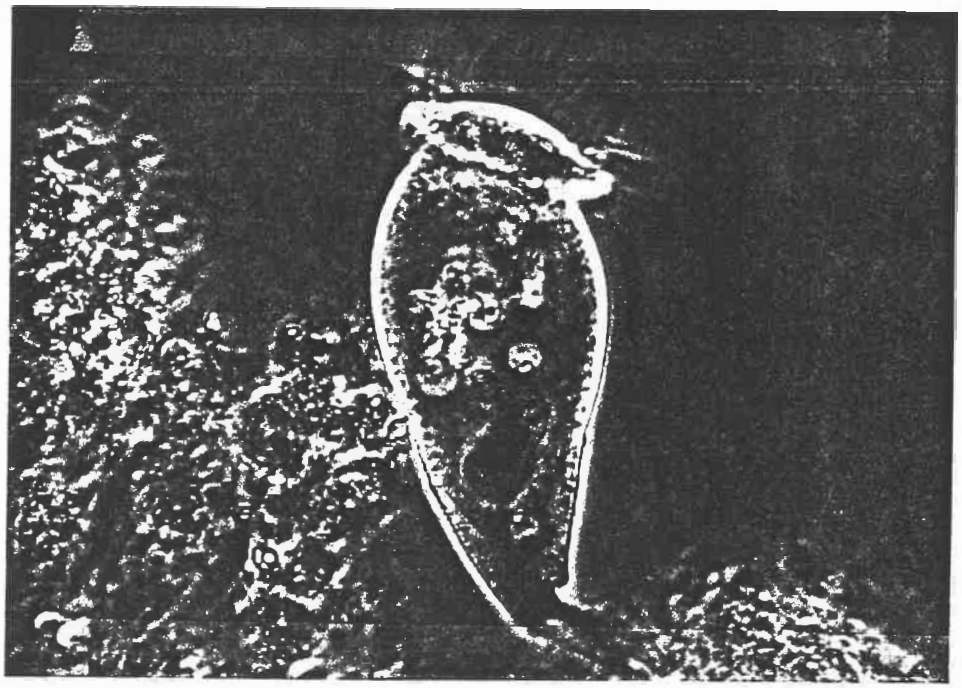


Figure A4.3: Protozoaire, "Cilié pertriche", *Vorticella*

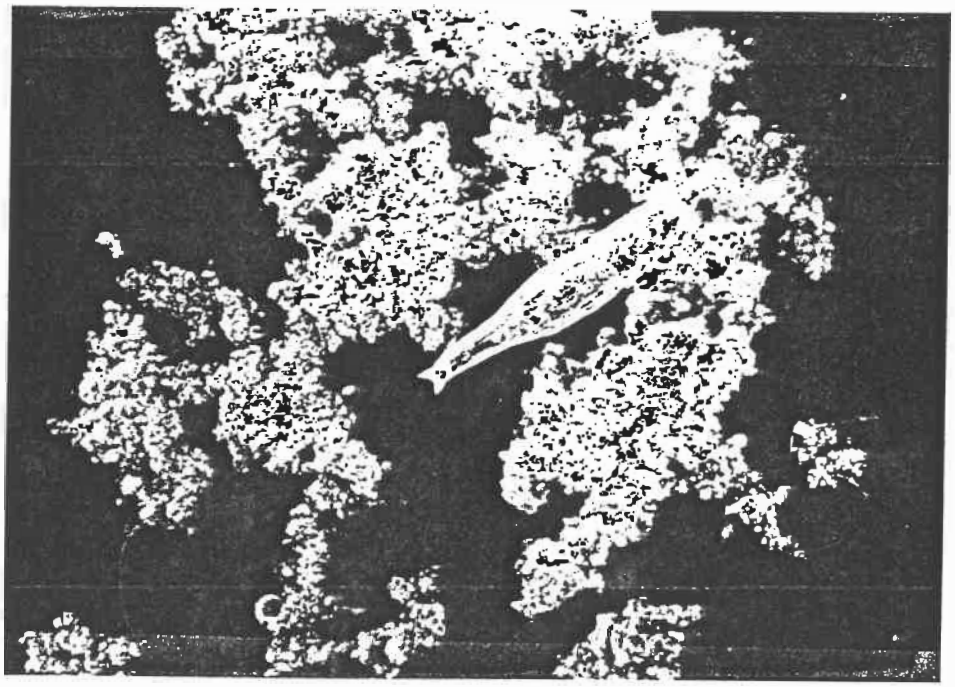


Figure A4.A: Métazoaire, Rotifère

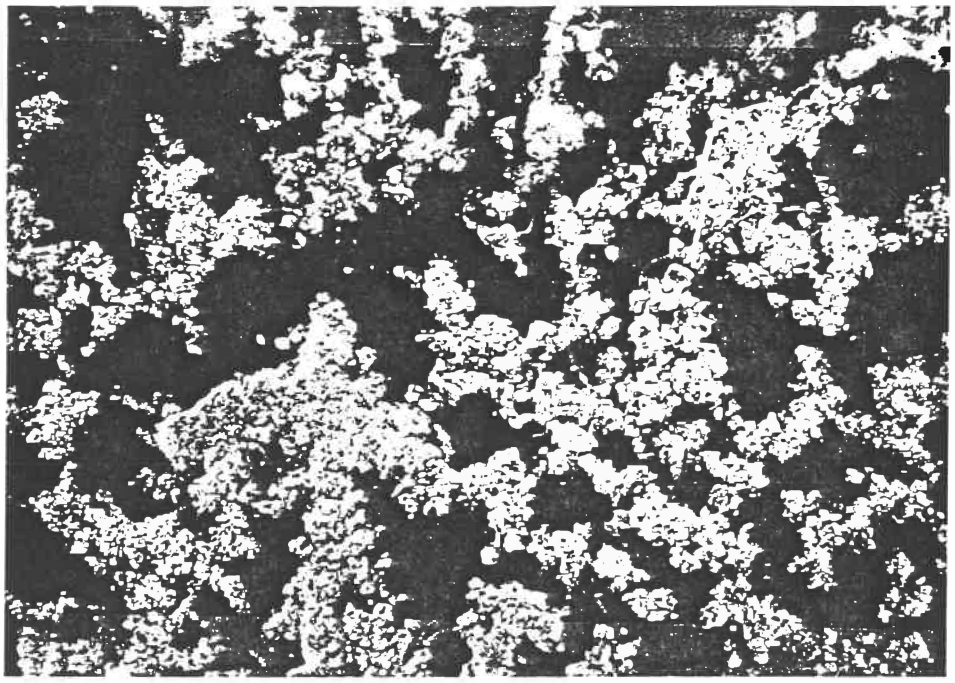


Figure A4.5: Morphologie du floc: Ferme et irrégulière

Note: Les photos ont été prises par

B. BLANCHARD, 1990

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00274910 7