



24537 RM

# THESE

**présentée** pour **obtenir le** grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE STRASBOURG I  
Ecole doctorale : Sciences Pour **l'Ingénieur**  
Discipline : Génie des **procédés**

par  
**Anne-Emmanuelle STRICKER**  
**Ingénieur** des Travaux Ruraux

**préparée** au  
Laboratoire des **Systèmes** Hydrauliques Urbains  
ENGEES

---

## APPLICATION DE LA MODELISATION A L'ETUDE DU TRAITEMENT DE L'AZOTE PAR BOUES ACTIVEES EN AERATION PROLONGEE : COMPARAISON DES PERFORMANCES EN TEMPS SEC ET EN TEMPS DE PLUIE

---

soutenue le 15 septembre 2000 devant le jury **composé** de :

Directeurs de <b>thèse</b>	Monsieur A. <b>HEDUIT</b> Monsieur P. LESSARD	Directeur de Recherche – Cemagref Antony Professeur – <b>Université</b> Laval <b>Québec</b>
Rapporteurs	Madame M.-N. PONS Madame M. TREMOLIERES Monsieur P. VANROLLEGHEM	Directeur de Recherche – LSGC Professeur - CEREG Professeur - <b>Université</b> de Gand
Examineur	Monsieur C. <b>BECK</b>	<b>Maître</b> de <b>Conférences</b> - ENGEES
<b>Invité</b>	Monsieur P. CHATELLIER	Docteur - Lyonnaise des Eaux <b>CIRSEE</b>

---

**TITRE**

Application de la modélisation à l'étude du traitement de l'azote par boues activées en aération prolongée : comparaison des performances en temps sec et en temps de pluie

---

**RESUME**

L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet de surcharges carbonées, azotées et hydrauliques sur les performances de traitement de l'azote par boues activées à très faible charge, en combinant mesures de terrain et modélisation mathématique avec le modèle IAWQ n°1.

Une procédure de fractionnement de la DCO et du NTK de l'affluent fondée sur un test de biodégradabilité en réacteur fermé a préalablement été développée et appliquée à 4 échantillons afin d'étudier la variabilité temporelle du fractionnement. La sensibilité des résultats de simulation au fractionnement de l'affluent a de plus été analysée, afin d'identifier les fractions les plus influentes et d'optimiser la fréquence de leur détermination.

Les résultats expérimentaux de fractionnement de l'affluent ont été réutilisés pour la simulation de deux campagnes de mesures approfondies de 48 h menées sur la station du Syndicat du Rosenmeer (67). Le modèle IAWQ n°1, mis en œuvre avec le logiciel GPS-X, a pu être calé sur la campagne de temps sec et validé en temps de pluie, en ajustant les concentrations en azote et en DCO simulées et mesurées dans les bassins.

Des scénarios de prévision ont ensuite été simulés afin de rechercher la capacité limite de traitement de la station, en fonction de paramètres tels que la température, le rapport DCO/NTK de l'affluent et le contrôle du séquençage de l'aération.

Une comparaison de l'approche usuelle par des formules empiriques et par la modélisation du fonctionnement des boues activées, en particulier concernant le calcul de la demande en oxygène, a montré que leurs résultats sont similaires en régime pseudo-permanent, mais qu'en régime transitoire les simulations sont mieux adaptées car elles ont l'avantage de tenir compte du bilan de masse des différents polluants dans les bassins.

---

**MOTS CLES**

BOUES ACTIVEES TRES FAIBLE CHARGE, NITRIFICATION, DENITRIFICATION, ASSIMILATION, MODELISATION, FRACTIONNEMENT DE L'AFFLUENT, SURCHARGE, TEMPS DE PLUIE, DEMANDE EN OXYGENE, SEQUENÇAGE ET DIMENSIONNEMENT DE L'AERATION

---

# RESUME

L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet de surcharges **carbonées**, azotées et hydrauliques sur les performances de traitement de l'azote par boues activées à très faible charge, en combinant mesures de terrain et **modélisation** mathématique avec le modèle IAWQ n°1.

Une procédure de fractionnement de la **DCO** et du NTK de l'affluent fondée sur un test de biodégradabilité en **réacteur fermé** a **préalablement** été développée et appliquée à 4 échantillons afin d'étudier la **variabilité** temporelle du fractionnement. La sensibilité des **résultats** de simulation au fractionnement de l'affluent a de plus été analysée, afin d'identifier les fractions les plus influentes et d'optimiser la **fréquence** de leur détermination.

Les **résultats** expérimentaux de fractionnement de l'affluent ont été réutilisés pour la simulation de deux campagnes de mesures approfondies de 48 h menées sur la station du Syndicat du Rosenmeer (67). Le modèle IAWQ n°1, mis en œuvre avec le logiciel GPS-X, a pu **être** calé sur la campagne de temps sec et validé en temps de **pluie**, en ajustant les concentrations en azote et en **DCO simulées** et **mesurées** dans les bassins.

Des scénarios de prévision ont ensuite **été** simulés **afin** de rechercher la capacité limite de traitement de la station, en fonction de **paramètres** tels que la **température**, le rapport **DCO/NTK** de l'affluent et le contrôle du **séquençage** de l'aération.

Une comparaison de l'approche usuelle par des formules empiriques et par la modélisation du fonctionnement des boues activées, en particulier concernant le calcul de la demande en oxygène, a montré que leurs résultats sont similaires en régime pseudo-permanent, mais qu'en régime transitoire les simulations sont mieux **adaptées** car elles ont l'avantage de tenir compte du bilan de masse des différents polluants dans les bassins.

**Mots** clés : BOUES ACTIVEES TRES FAIBLE CHARGE, **NITRIFICATION**, **DENITRIFICATION**, ASSIMILATION, MODELISATION, FRACTIONNEMENT DE L'AFFLUENT, SURCHARGE, TEMPS DE PLUIE, DEMANDE EN OXYGENE, SEQUENÇAGE ET DIMENSIONNEMENT DE L'AERATION

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>3</b>
R E S U M E.....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>11</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>17</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>21</b>
NOMENCLATURE .....	<b>25</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>29</b>
<b>1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>35</b>
<b>I.1 Nécessité de traiter les eaux usées unitaires de temps de pluie</b> .....	<b>37</b>
X.1.1 <b>Caractéristiques</b> des effluents unitaires de temps de pluie .....	37
1.1.1.1 Origine de la pollution de temps de pluie.....	38
<b>I.1.1.2</b> Nature de la pollution unitaire de temps de pluie .....	39
<b>I.1.1.3</b> Concentrations moyennes .....	41
<b>I.1.1.4</b> Flux.....	41
1.1.1.5 <b>Variabilité</b> dans le temps et dans l'espace.....	42
<b>I.1.1.6</b> Conclusion .....	43
<b>I.1.2</b> Approche <b>intégrée</b> au niveau du système <b>d'assainissement</b> .....	43
1.1.2.1 <b>Flux</b> collectes .....	44
1.1.2.2 Flux rejetés au milieu naturel en l'absence de bassin d'orage ou de traitement en ligne.....	45
1.1.2.3 Efficacité des bassins d'orage ou du traitement en ligne .....	45
1.1.2.4 Conclusion-discussion .....	45
<b>I.1.3</b> Impact des rejets sur le milieu récepteur .....	46
1.1.3.1 Les polluants à effets aigus .....	46
<b>I.1.3.2</b> Les polluants à effets <b>accumulatifs</b> .....	47
1.1.4 Aspects réglementaires.....	48
<b>I.1.4.1</b> Les textes .....	48
1.1.4.2 Les obligations.....	48
1.1.4.3 Conclusion .....	49
<b>I.2 Effet du temps de pluie sur les stations d'épuration traitant l'azote sur réseau unitaire</b> .....	<b>50</b>
<b>I.2.1</b> Les chocs engendres .....	50
1.2.1.1 Nature .....	50
1.2.1.2 <b>Variabilité</b> .....	51
1.2.1.3 Dynamique .....	52
1.2.2 <b>Impacts</b> sur les stations d'épuration .....	52
<b>I.2.2.1</b> Moyens d'étude.....	52
1.2.2.2 Impacts sur les <b>prétraitements</b> .....	53
1.2.2.3 Impacts sur le traitement biologique.....	54
1.2.2.4 Impacts sur le clarificateur .....	59

1.2.3 Dimensionnement et gestion des stations pour faire face au temps de pluie.....	60
<b>13 Le modèle boues activées IA WQ n°1 .</b> .....	<b>60'</b>
1.3.1 Justification du choix du <b>modèle</b> .....	60
1.3.2 Variables.....	<b>61</b>
1.3.2.1 Notations.....	62
<b>1.3.2.2 Variables carbonées</b> .....	62
1.3.2.3 Variables <b>azotées</b> .....	<b>63</b>
1.3.3 Processus .....	<b>63</b>
<b>I.4 Caractérisation de l'affluent en vue de l'utilisation du modèle de l'IA WQ n°1.....</b>	<b>66</b>
<b>I.4.1 Une nécessité expérimentale.....</b>	<b>66</b>
1.4.2 <b>Méthodes</b> de fi-actionnement de la <b>DCO.....</b>	<b>68</b>
<b>I.4.2.1</b> Fractionnement physique ou physico-chimique de l'affluent pour la <b>détermination</b> de la fraction "soluble" ( <b>S<sub>so</sub> + S<sub>io</sub></b> ).....	69
1.4.2.2 Suivi d'un pilote en <b>régime</b> permanent pour la <b>détermination</b> des <b>fractions</b> inertes.....	<b>75</b>
1.4.2.3 Tests de <b>biodégradabilité</b> en <b>réacteur fermé</b> pour déterminer la fi-action <b>biodégradable</b> totale ou les <b>fractions</b> inertes .....	<b>77</b>
<b>I.4.2.4</b> <b>Respirométrie</b> .....	<b>80</b>
<b>I.4.3 Méthodes</b> de <b>fractionnement</b> de l'azote.....	<b>84</b>
1.4.4 <b>Résultats</b> .....	86
1.4.4.1 DCO.....	86
1.4.4.2 NTK .....	88
I.4.5 Conclusion : comparaison des <b>différentes</b> techniques .....	89
<b>1.5 Conclusion et objectifs.....</b>	<b>91</b>
<b>II MATERIEL ET METHODE.....</b>	<b>93</b>
<b>II.1 Caractérisation de l'affluent.....</b>	<b>95</b>
II.1.1 Conduite <b>expérimentale</b> des tests .....	<b>96</b>
<b>II.1.1.1</b> Constitution de Echantillon d'affluent .....	%
<b>II.1.1.2</b> <b>Mise en place du test</b> .....	97
<b>II.1.1.3</b> <b>Suivi du test</b> .....	99
<b>II.1.1.4</b> <b>Prélèvements</b> et analyses .....	99
II.1.2 <b>Détermination</b> des fractions de la <b>DCO</b> et de l'azote.....	100
11.1.3 <b>Caractéristiques</b> des <b>échantillons</b> fraction&.....	104
<b>II.2 Campagnes de mesures sur site.....</b>	<b>105</b>
<b>II.2.1</b> Le site d'étude .....	105
II.2.2 <b>Caractéristiques</b> du <b>réseau</b> .....	106
II.2.3 <b>Caractéristiques</b> de la station d'épuration.. .....	106
<b>II.2.4</b> <b>Données</b> de dimensionnement.....	110
<b>II.2.4.1</b> Charges à traiter.....	110
<b>II.2.4.2</b> <b>Performances</b> de traitement attendues .....	111
II.2.5 <b>Données</b> de fonctionnement .....	112
<b>II.2.5.1</b> Charges entrantes.....	113
II.2.5.2 <b>Performances</b> de traitement .....	113
II.2.5.3 <b>Caractéristiques</b> de la boue .....	114
II.2.6 Campagnes de mesures sur site .....	114
<b>II.2.6.1</b> Points et modes d'échantillonnage .....	115

II.2.6.2 Paramètres et fréquences des prélèvements.....	115
II.2.6.3 Conservation et analyses des échantillons.....	116
II.2.6.4 Données enregistrées en continu.....	117
II.2.6.5 Gestion particulière de la station pendant les campagnes.....	117
II.2.6.6 Contexte et conditions particulières de chaque campagne.....	118
<b>II.3 Méthodes d'analyse . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>II.4 Le logiciel de simulation GPS-X.....</b>	<b>119</b>
II.4.1 Justification du choix du logiciel.....	120
II.4.2 Utilisation et fonctionnalités.....	120
<b>III RESULTATS.....“.....”,.....,.....</b>	<b>123</b>
<b>III.1 Comportement de la station en temps sec et en temps de pluie au niveau journalier (données d'autosurveillance). . . . .</b>	<b>125</b>
III.1.1 Données.....	125
III.1.1.1 Nature et origine.....	125
III. 1.1.2 Mesure de la production de boue annuelle.....	125
III.1.1.3 Tri des journées temps sec/temps de pluie.....	126
III. 1.2 Résultats en temps sec et temps de pluie.....	126
III.1.2.1 Importance du temps de pluie sur l'année.....	126
III. 1.2.2 Flux entrants en temps sec et en temps de pluie.....	127
III. 1.2.3 Performances de traitement en temps sec et en temps de pluie.....	129
III. 1.3 Production de boue à l'échelle annuelle.....	131
III. 1.4 Conclusion.....	132
<b>III.2 Campagnes de mesures sur la station.....</b>	<b>135</b>
III.2.1 Campagne de temps sec.....	135
III.2.1.1 Analyse globale des 2 journées.....	135
III.2.1.2 Evolution dynamique fine des paramètres.....	139
III.2.3 Campagne de temps de pluie.....	142
III.2.2.1 Analyse globale des 2 journées.....	142
III.2.2.2 Evolution dynamique fine des paramètres.....	146
III.2.3 Comparaison des 2 campagnes.....	149
III.2.3.1 Affluent prétraité.....	149
III.2.3.2 Effluent traité.....	151
III.2.3.3 Caractéristiques de la boue.....	152
III.2.3.4 Conclusion.....	152
<b>III.3 Caractérisation de l'affluent. . . . .</b>	<b>155</b>
III.3.1 Evolution et interprétation des concentrations en DCO et en azote au cours des tests de fractionnement.....	155
III.3.1.1 DCO.....	155
III.3.1.2 NTK.....	158
III.3.1.3 Paramètres physico-chimiques.....	161
III.3.1.4 Conclusion.....	163
III.3.2 Mise au point du test.....	163
III.3.2.1 Influence de l'agitation.....	164
III.3.2.2 Influence de l'ensemencement.....	164
III.3.2.3 Durée du test.....	164
III.3.2.4 Evaluation des hypothèses de départ.....	165
III.3.2.5 Conclusion.....	166
III.3.3 Résultats de fractionnement.....	167

III.3.3.1	DCO .....	168
III.3.3.2	NTK .....	170
III.3.3.3	Conclusion-discussion .....	172
III.3.4	Evaluation de la méthode et <b>perspectives</b> .....	173
III.3.4.1	Evaluation du protocole tel que <b>décrit</b> dans <b>matériel</b> et méthode .....	173
III.3.4.2	Suggestions de modification du protocole pour la <b>DCO</b> .....	174
III.3.4.3	Suggestions de modification du protocole pour le <b>NTK</b> .....	175
III.3.5	Utilisation des <b>résultats</b> de fractionnement dans les simulations .....	<b>175</b>
III.3.5.1	DCO .....	175
III.3.5.2	NTK .....	<b>177</b>
<b>III.4</b>	<b>Calage et validation du modèle sur les campagnes de mesures</b> .....	<b>179</b>
<b>III.4.1</b>	<b>Schématisation</b> de la station du Syndicat du Rosenmeer .....	179
III.4.1.1	<b>Schéma</b> hydraulique .....	179
III.4.1.2	<b>Modèles</b> .....	180
III.4.2	Calage sur la campagne de mesures de temps sec .....	181
III.4.2.1	<b>Détermination</b> de l'état initial .....	181
RI.4.2.2	<b>Détermination</b> des variables <b>d'entrée</b> de la campagne de mesure .....	186
III.4.2.3	<b>Calage</b> visuel des <b>paramètres</b> .....	187
III.4.2.4	Calage <b>mathématique complémentaire</b> .....	193
III.4.2.5	Jeu de <b>paramètres</b> final et signification .....	195
III.4.2.6	Sensibilité des simulations aux <b>paramètres</b> du <b>modèle</b> .....	196
<b>III.4.2.7</b>	Analyse complémentaire du fonctionnement de la station pendant la campagne de temps sec <b>grâce à</b> la simulation .....	199
III.4.3	Validation sur la campagne de temps de pluie .....	204
<b>III.4.3.1</b>	Détermination de l'état initial .....	<b>204</b>
III.4.3.2	Simulation de validation .....	205
III.4.3.3	<b>Comparaison</b> du fonctionnement de la station en temps sec et en temps de pluie <b>d'après</b> les <b>résultats</b> de simulation .....	208
<b>III.5</b>	<b>Analyse de sensibilité</b> des simulations <b>au fractionnement de la DCO de l'affluent</b> .....	<b>213</b>
<b>III.5.1</b>	<b>Problématique</b> .....	213
III.5.2	Méthode .....	213
III.5.3	<b>Résultats</b> .....	215
<b>III.5.3.1</b>	Production et composition de la <b>fraction</b> organique de la boue .....	215
III.5.3.2	Qualité du traitement .....	<b>216</b>
<b>III.5.3.3</b>	Demande en oxygène .....	219
III.5.3.4	Discussion - Conclusion .....	220
<b>III.6</b>	<b>Application de la simulation à la prévision du fonctionnement de la station lors de surcharges</b> .....	223
<b>III.6.1</b>	<b>Description</b> des <b>scénarios</b> testes .....	<b>223</b>
<b>III.6.1.1</b>	<b>Déroulement</b> .....	223
<b>III.6.1.2</b>	<b>Aération</b> .....	224
<b>III.6.1.3</b>	Extraction de boue .....	<b>226</b>
<b>III.6.1.4</b>	<b>Température</b> .....	226
<b>III.6.1.5</b>	Récapitulatif des cas simules .....	<b>226</b>
III.6.2	Exploitation des <b>résultats</b> .....	<b>227</b>
III.6.3	Résultats <b>à 20°C</b> .....	228
<b>III.6.3.1</b>	Surcharges <b>réalistes</b> .....	<b>228</b>
III.6.3.2	Recherche de la capacité maximale de <b>nitrification</b> .....	238
III.6.3.3	Comparaison de l'efficacité du <b>séquençage</b> de l' <b>aération</b> en mode horloge et <b>rédox</b> .....	<b>243</b>
III.6.4	Résultats <b>à 10°C</b> .....	245
<b>III.6.4.1</b>	Comparaison <b>E2/1,5</b> et <b>H2/1,5</b> .....	246

III.6.4.2 Recherche de la charge limite traitable à 10°C .....	248
III.65 Comparaison de la demande en oxygène journalière simulée et calcul& .....	248
II.I.6.6 Dimensionnement de la capacité d'aération .....	251
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>253</b>
<b>LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>263</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>271</b>



Les objectifs actuels de l'assainissement sont la protection des communautés humaines contre le risque sanitaire et les inondations, et la protection du milieu naturel et de ses usages. Un système d'assainissement collectif est composé d'un réseau (canalisations + ouvrages) et d'une station d'épuration. En système unitaire, le réseau collecte, transporte et **régule** (par stockage et déversements au milieu récepteur) les flux **générés** en temps sec et en temps de pluie et les dirige vers l'unité de traitement.

En temps de pluie, le milieu naturel **reçoit** donc les flux déversés sans traitement ou après traitement partiel en ligne, et ceux traités en station. Les études montrent que les rejets directs représentent souvent une part importante de la pollution totale rejetée par temps de pluie. Un moyen de **réduire** la pollution de temps de pluie est donc de maximiser les flux traités en station par :

- la maximisation du débit instantané traitable en pointe
- le stockage et le traitement différé d'une part du **débit** dépassant la capacité de pointe

**tout en** conservant des performances de traitement compatibles avec les exigences du milieu naturel, et sans détériorer le fonctionnement de **l'installation**.

L'épuration biologique par boues activées en aération prolongée, qui permet un traitement poussé de l'azote, est un procédé **très** répandu en France. Ce 'travail s'inscrit dans la **démarche** globale actuelle qui vise à :

- mieux comprendre le comportement dynamique (à un pas de temps inférieur à la journée) des boues activées traitant l'azote lorsqu'elles sont soumises **à** des variations de charge aléatoires assimilables à des chocs,
- rechercher quels sont la charge maximale admissible et ses facteurs limitants, pour conserver un bon niveau de traitement de l'azote en temps de pluie,
- établir des recommandations pour optimiser le dimensionnement et la gestion de l'étage biologique de telles stations tout en tenant compte des contraintes économiques.

La demande opérationnelle dans ce sens a **été** initiée par la **réglementation**, qui s'oriente depuis le début des années 90 vers une approche plus globale de l'assainissement et vers des exigences d'efficacité renforcées.

Les phénomènes dynamiques en jeu dans les boues activées sont complexes et interagissent, et seule leur résultante est accessible à la mesure. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser la modélisation numérique des boues activées qui a le **double** avantage de permettre la décomposition de cette résultante en processus simples simultanés, et le test **d'hypothèses** et

de **stratégies** de gestion et de dimensionnement au-delà des limites matérielles imposées par l'expérimentation. Les simulations ne dispensent cependant pas de mesures **préalables** : les **résultats** calculés ne peuvent être valides que si le modèle est calé, c'est à dire si ses données d'entrée (**caractéristiques** de l'affluent) et ses **paramètres** de la boue sont mesurés ou ajustés, pour qu'il **représente** au mieux le site **réel**.

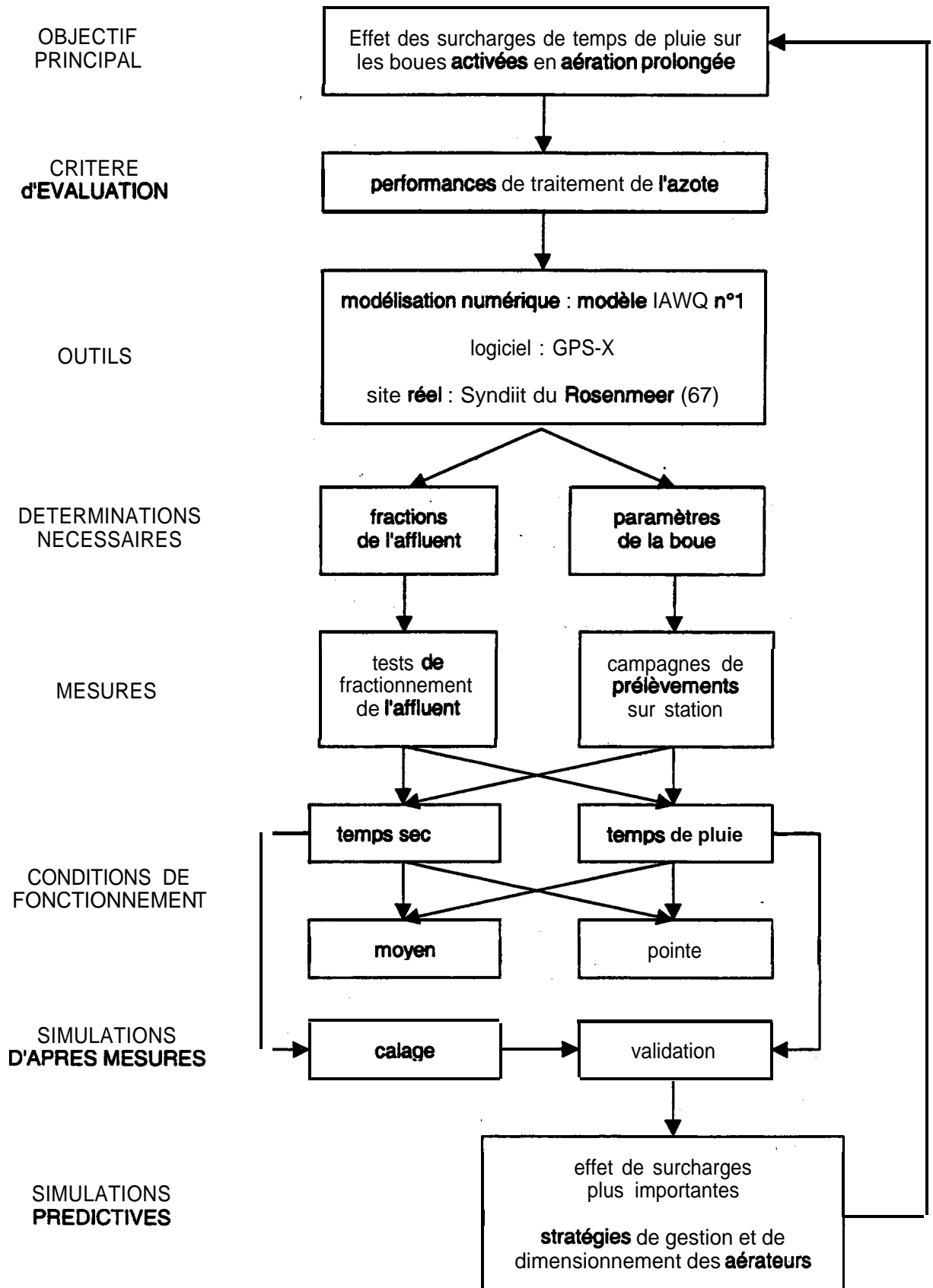
Nous avons simulé le fonctionnement en temps sec et en temps de pluie d'une station d'épuration en **aération** prolongée (Syndicat du Rosenmeer, Bas-Rhin) en utilisant le modèle **IAWQ n°1**. Il est basé sur une caractérisation de la **DCO** et de l'azote de l'affluent qui n'est pas accessible par les analyses traditionnelles en épuration.

La **première** phase de ce travail a donc consisté à développer à partir de protocoles **décrits** dans la **littérature** une méthode simple et globale de **caractérisation** des fractions de la **DCO** et du **NTK** entrants. Nous l'avons appliquée à quelques échantillons d'affluent **représentant** des situations moyennes et extrêmes de temps sec et de temps de pluie pour évaluer la variabilité temporelle de ces fractions.

La seconde phase a consisté à caler les paramètres du modèle non mesurés en situation de temps sec et d'évaluer leur validité en temps de pluie à l'aide de campagnes de mesures approfondies sur site. Ceci a aussi permis de mieux comprendre l'impact du temps de pluie sur le traitement de **l'azote** dans le cas de cette station.

Enfin nous avons pu simuler et extrapoler des situations plus générales à partir de cet exemple, pour tenter de mieux comprendre l'impact de surcharges plus intenses et survenant dans des conditions plus défavorables que celle suivie, rechercher les capacités maximales de traitement, et comparer l'efficacité de stratégies de **séquençage** et de dimensionnement de l'aération sur le traitement de l'azote.

Le cheminement logique de la construction de cette étude est repris dans le schéma ci-dessous.



Le premier chapitre de ce mémoire (étude **bibliographique**) fait le point sur les **caractéristiques** des affluents de temps de pluie et leurs impacts sur les stations d'épuration biologiques. Ensuite le principe du modèle numérique **IAWQ n°1** est rappelé avant de recenser et comparer les **méthodes** existantes pour **déterminer** les fractions de l'affluent et d'exposer leurs **résultats** sur différentes eaux **usées**.

Le second chapitre (**matériel** et méthode) expose la version finale de la méthode expérimentale développée dans cette étude pour le fractionnement de l'affluent, puis **détaille** le protocole des campagnes **d'échantillonnage** menées sur site pour caler et valider le modèle. Enfin le logiciel GPS-X utilisé pour les simulations est **présenté**.

**Le** dernier chapitre présente et commente les **résultats** des mesures puis des simulations. Les **caractéristiques** des charges entrant sur la station d'épuration et son fonctionnement sont **comparées** en temps sec et en temps de pluie, d'abord **à** l'échelle journalière d'après un an de données d'autosurveillance, puis **à** l'échelle dynamique **d'après** les campagnes de mesures spécifiques de 48 h. Ensuite le **déroulement** et les **résultats** finaux des tests de fractionnement de l'affluent sont exposés et analysés. La présentation des **résultats** de simulation commence par le calage et la validation du **modèle** et l'analyse de la sensibilité des simulations aux paramètres de la boue et au fractionnement de l'affluent. Enfin les **résultats** de scénarios comparent les capacités de traitement de la station selon l'intensité de la surcharge, le rapport **DCO/N** de l'affluent, la **température** de la boue et le **séquençage** de l'aération.

### **Rappel des objectifs**

L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet de surcharges organiques, azotées et hydrauliques sur les performances de traitement de l'azote d'une station d'épuration à boues activées à **très** faible charge. L'outil utilisé est la modélisation mathématique avec le modèle IAWQ n°1, afin de pouvoir dépasser le cadre de **l'expérimentation**. Cependant la simulation de scénarios de **prévision** doit être précédée de plusieurs étapes d'acquisition de données sur site (fractionnement de l'affluent, campagnes de mesures) et d'ajustement du **modèle** (calage, validation, analyse de sensibilité), **afin** de pouvoir s'assurer d'une certaine **représentativité** des **résultats** de simulations. Ainsi se sont ajoutés des objectifs secondaires concernant la méthodologie et **l'importance** de ces étapes préliminaires.

### **Principaux résultats**

Nous avons initié la mise au point d'un protocole de fractionnement de la **DCO** et du NTK qui, par rapport aux méthodes **décrites** dans la **littérature**, **présente** les avantages d'être simple et de permettre la détermination de toutes les fractions de l'affluent (hors biomasse) en un seul test. Il consiste à suivre l'évolution de la **DCO** et des formes de l'azote totales et **filtrées** sur de l'affluent brut et **filtré à 1,2 µm** en incubation dans deux **réacteurs**ensemencés en boue et **aérés**, pendant environ 3 semaines.

Le protocole a été appliqué à 2 échantillons de temps sec et 2 de temps de pluie. L'évolution des concentrations dans les **réacteurs** a mis en évidence les points suivants :

- Les filtres, et **en** particulier les membranes organiques, **présentent** un risque de relargage de **DCO** soluble dans le filtrat. Une procédure de lavage à l'eau déminéralisée suivi d'un rinçage avec **l'échantillon** semble efficace, mais on recommande de privilégier quand on le peut les filtres minéraux (fibres de verre par exemple).
- Nous avons pu confirmer que la fraction de **DCO** soluble inerte (Si) est constituée de molécules de petite taille, inférieure au moins à **0,45 µm**.
- La minéralisation de la biomasse qui se développe dans les **réacteurs** n'est pas encore achevée au bout d'un mois d'incubation.
- La **nitrification** dans les **réacteurs** démarre **après** une phase de **latence** de plusieurs jours, et la fraction **particulaire** de l'affluent apporte un ensemencement en nitrifiantes.

D'après les **résultats** finaux de fractionnement, les spécificités de l'affluent de la station du Syndicat du Rosenmeer sont sa biodégradabilité élevée, et sa faible teneur en **DCO** soluble

inerte, celle-ci étant **confirmée** par la faible concentration en **DCO** de l'**effluent** de la station. La variabilité temporelle du fractionnement est apparue plus clairement au niveau intrajournalier que d'une journée à l'autre. Par rapport aux **échantillons** moyens journaliers, les événements de pointe de quelques heures en temps sec et en temps de pluie se distinguent surtout par leur teneur supérieure en **DCO** particulaire lentement biodégradable (**Xs**).

Les **résultats** sur le NTK ont confirmé que les fractions d'azote organique inerte (soluble et particulaire) sont **très** faibles devant les fractions **dégradables**, du moins à l'échelle des échantillons moyens journaliers.

Comme certains **résultats** des tests restent incertains ou discutables, nous avons étudié la sensibilité des simulations au fractionnement de la **DCO** de l'affluent, dans la limite des valeurs **mesurées**, et il ressort que pour la station étudiée, les fractions importantes, donc à mesurer, sont :

- la **DCO** soluble inerte (Si), qui est déterminante pour l'estimation du rejet de DCO.
- la teneur de l'affluent en **DCO** biodégradable, qui influe sur la production de boue, sa richesse en biomasse **hétérotrophe**, et sur la vitesse de **dénitrification**.

Il semble que la distinction entre la **DCO** rapidement assimilable (Ss) et lentement **dégradable** (Xs) ne soit pas fondamentale, bien que cela n'ait pas été rigoureusement prouvé. Par contre nous avons **montré** que la **différenciation** de la biomasse **hétérotrophe** de l'affluent (**Xbh**), que le protocole inclut dans la **DCO** lentement dégradable, ne semble pas nécessaire.

Le fractionnement d'un échantillon représentatif de la période **nocturne** puis diurne semble suffisant pour simuler correctement le comportement dynamique de la station étudiée. Le bénéfice d'une **caractérisation** plus fréquente n'est pas apparu clairement, malgré la variabilité **intrajournalière** au pas de temps de quelques heures. Par contre, la **détermination** de la **DCO** totale de l'affluent à laquelle on applique ensuite le fractionnement déterminé, doit certainement être maintenue à un pas de temps plus fin.

Les résultats de fractionnement des échantillons journaliers ont été utilisés pour le fractionnement de l'affluent pour la simulation des deux campagnes de mesures de 48 h menées sur site. La campagne de temps sec a servi à caler les **paramètres** du modèle IAWQ n°1. La révision à la baisse de **5 paramètres** sur 19 par rapport à leurs valeurs par défaut a permis d'obtenir un bon ajustement entre concentrations simulées et **mesurées**, tant dans les bassins qu'en sortie. Les coefficients de demi-saturation **Knh** et **Kno** ont été fortement **réduits**, ce qui indiquerait l'absence de **limitation** de la **nitrification** et de la **dénitrification** par les faibles concentrations en **NH<sub>4</sub>** respectivement **NO<sub>x</sub>**. La dénitrification simultanée prévue par

le modèle a été quasiment supprimée puisque Koh a également été calé à une valeur très basse. Enfin le taux maximal de croissance des autotrophes ( $\mu_{\max}$ ) et la teneur de la biomasse en azote ( $i_{xb}$ ) ont été réduits de **50%** respectivement **30%**. L'opération de **calage** a montré qu'avec le type de **données** utilisées, l'ajustement visuel, local et raisonné des valeurs **simulées** et **mesurées** était plus **adapté** que l'optimisation mathématique, **procédure** trop globale.

Le calage a pu être validé sur la campagne de temps de pluie, indiquant que le modèle calé en temps sec est capable de simuler le fonctionnement de la station dans différentes conditions tant que l'on connaît les variables **d'entrée**.

Une première approche du fonctionnement de la station du Syndicat du Rosenmeer en temps de pluie a été obtenue en exploitant une **année** de données **d'autosurveillance**. D'abord l'étude des charges à traiter a **montré** qu'en temps sec, la station fonctionne en moyenne à 70% de sa capacité nominale en **DCO** et 50% de celle en azote. Le temps de pluie, qui concerne la station plus de deux jours par semaine en moyenne, apporte une charge polluante supplémentaire, principalement sous 'forme **particulière** et dont la teneur minérale est élevée. Ainsi les charges entrantes augmentent en moyenne de 70% pour les **MES**, et seulement 25% pour le carbone et l'azote. Cependant les variations sont fortes autour de ces moyennes, et occasionnellement la charge nominale peut **être** atteinte pour l'azote et même dépassée pour la DCO. Toutes ces observations confirment celles de la bibliographie.

Ensuite, l'analyse des performances de traitement a **montré** qu'elles sont excellentes pour tous les **paramètres**. Les faibles concentrations du rejet en **DCO** et en **MES** sont particulièrement remarquables, et s'expliquent par la faible teneur de l'affluent en **DCO** soluble inerte, et par le dimensionnement large du clarificateur combiné à un bon indice de boue. Le temps de pluie n'affecte pas significativement les concentrations de sortie ni les rendements, mais les flux moyens rejetés augmentent de 30 à 100%.

Les campagnes de mesures ont permis d'approcher le comportement dynamique de la station en temps sec et en temps de pluie, à 20°C. Concernant les charges entrantes, la campagne de temps sec est **représentative** de la situation moyenne. Le débit et la charge de **MES** ont augmenté pour celle de temps de pluie, mais les charges en **DCO** et **NTK** étaient équivalentes à celles de temps sec. Au point de vue dynamique, les charges et le débit ont gardé la même **périodicité** pendant les deux jours de temps sec, alors qu'en temps de pluie ce rythme a été bousculé par une succession d'événements : vidange de bassin d'orage, retour au temps sec,

lavage du bassin et arrivée d'un nouvel orage. Pourtant, les pointes de charge horaire n'ont pas été plus fortes qu'en temps sec.

En sortie, l'effluent de temps sec a gardé des caractéristiques identiques les deux jours de temps sec, par contre les deux jours de temps de pluie diffèrent. Globalement, le principal **paramètre altéré** en temps de pluie est le flux de **DCO** soluble, alors que celui d'ammoniaque est resté proche de celui de temps sec. **Grâce** aux simulations, on a effectivement pu montrer que les vitesses maximales de nitrification et de **dénitrification** n'ont pas été **altérées** par le temps de pluie. Au contraire la croissance des bactéries hétérotrophes était moins limitée par le substrat et la vitesse de **dénitrification** s'en est **trouvée** renforcée. Le potentiel de nitrification et de **dénitrification** sont les mêmes qu'en temps sec mais le temps de pluie peut permettre de mieux les mobiliser. Concernant le rejet de DCO, l'explication ne **réside** pas non plus dans une **altération** de l'élimination de la **DCO dégradable**, mais dans l'augmentation du rejet de **DCO** inerte, dont la cause est purement hydraulique : l'augmentation du débit chasse vers la sortie la masse de **DCO** soluble inerte qui est accumulée dans les bassins en **régime "pseudo-permanent"** de temps sec.

Pour aller plus loin, nous avons ensuite appliqué la simulation à des **scénarios de prévision**. D'abord la simulation d'événements pluvieux plausibles à 20°C avec un débit et des charges cependant **supérieurs** à ceux du temps de **pluie** échantillonné, a **montré** que :

- La station est capable de traiter un événement où le débit serait multiplié par 7, la charge en **DCO** par 3 et celle en **NTK** par **1,8** par rapport à la charge actuelle de temps sec, soit 220% de la charge nominale en **DCO** et 75% de celle en azote. Les seules variables dont les concentrations augmentent significativement dans la boue pendant la surcharge sont la **DCO** lentement **dégradable**, qui s'accumule, et la biomasse **hétérotrophe**, dont la croissance est accélérée. En sortie, la dilution de l'effluent et la forte augmentation du flux de **DCO** soluble est **confirmée**. Les composés solubles dégradables sont moins sensibles à cet effet de chasse que les composés inertes car leur lessivage est amplement limité par leur dégradation.
- La vitesse maximale de nitrification reste constante pendant la surcharge et **les** vitesses maximales de **dénitrification** et d'assimilation augmentent grâce au développement de la population hétérotrophe et à l'accroissement de la **DCO dégradable**. La surcharge en azote sollicite ainsi à peine la capacité de nitrification, la majeure partie étant éliminée par assimilation, grâce à l'apport supplémentaire de **DCO dégradable**.



- La demande en oxygène augmente de **50%**, ce qui n'est donc pas dû à la nitrification mais à la dégradation de la DCO.
- La durée de **récupération** varie selon les paramètres, et augmente avec la charge. L'azote est le premier à retrouver sa concentration initiale dans la boue, suivi par la **DCO dégradable**. Par contre la **DCO** soluble ainsi que la biomasse et la demande en oxygène mettent plusieurs jours à revenir **à** leur niveau de départ.
- L'allongement de la **durée** de la surcharge sur plusieurs jours ne semble pas être un facteur aggravant pour la qualité du traitement. Pour **certains** paramètres (**NH<sub>4</sub>**, **NO<sub>x</sub>**) la station entre simplement dans un nouvel état permanent. Par contre la biomasse **hétérotrophe** continue à se **développer** ce qui implique un accroissement **régulier** de la demande en oxygène.

On a ensuite simulé des surcharges beaucoup plus **élevées** et actuellement improbables, afin de rechercher la **capacité** maximale de traitement de la station. **Il** ressort que dans l'état actuel, la station pourrait traiter une surcharge pouvant **représenter** jusqu'à 4 fois sa charge actuelle de temps sec **à 20°C**, soit 3 fois sa charge nominale en **DCO** et **1,7** fois celle en **NTK**, sans dépasser 10 **mgN/l** en sortie. Ceci correspond tant **à** la limite de **capacité** biologique que celle de l'aération en place. Par contre une surcharge en **NTK** sans augmentation concomitante de la **DCO** est limitée **à** un facteur de 2 à 3, ce qui **équivalut** à sa charge nominale en azote. Ce facteur limite est déterminé par la capacité maximale de nitrification, et ne peut être dépassé que si la capacité d'assimilation est également **renforcée** par un accroissement parallèle de la charge en **DCO** dégradable.

Les mêmes **scénarios** ont été simulés dans des conditions hivernales, en **considérant** une baisse progressive de température jusqu'à 10°C. Le modèle prévoit que le **potentiel** de nitrification serait divisé par un facteur **supérieur** à 2 par rapport à **20°C**, par combinaison d'un appauvrissement de la boue en nitrifiantes et d'un 'ralentissement de leur cinétique spécifique. Par contre, le **potentiel** de dénitrification resterait identique toute l'année, car en hiver le ralentissement de la cinétique spécifique des **hétérotrophes** serait compensé par l'augmentation de leur population. Cependant la mobilisation de ces potentiels dépend des **caractéristiques** de l'affluent et de la gestion de la station. L'allongement de la **durée** d'aération pour compenser la diminution de la vitesse de **nitrification** devient nuisible à la vitesse (moins de **DCO** dégradable disponible) et à la **durée** de dénitrification. Ainsi en temps sec, les

charges rejetées de **NH<sub>4</sub>** et de **NOx** sont finalement multipliées par 4 à **10°C** par rapport à 20°C. La surcharge "**plausible**" de temps de pluie testée à 20°C (débit x 7, charge en **DCO** x 3 et charge en **NTK** x **1,8** par rapport à la charge actuelle de temps sec) pourrait également être **traitée** à **10°C**, moyennant le doublement du flux de NGL rejeté par rapport à 20°C.

Par contre, à **10°C**, le facteur de surcharge en **NTK** seul permettant de ne pas dépasser 10 **mgN/l** en sortie est **inférieur** à 2, ce qui **représente** une charge **inférieure** à la charge nominale. Comme à **20°C**, l'augmentation parallèle de la charge en **DCO** renforce la capacité d'élimination de **l'azote**.

La comparaison du **séquençage** de l'aération par horloge et par asservissement sur le **rédox** a montré que même si dans certains cas, le mode horloge aurait permis de légèrement diminuer le rejet de NGL, le mode **rédox** a clairement des avantages de souplesse : il permet d'adapter **l'aération** à la charge entrante et aux cinétiques, en particulier en cas de surcharge **élevée**. Il permet une meilleure utilisation de la **DCO dégradable** pour éliminer l'azote, et de conserver un certain **équilibre** entre les rejets de **NH<sub>4</sub>** et de **NOx**.

Nous avons confronté la demande en oxygène calculée par la méthode usuelle de dimensionnement et par le **modèle IAWQ n°1**.

En régime pseudo-permanent (temps sec) pour une boue activée en **très** faible charge, les deux méthodes donnent des **résultats** proches. Ceux de la méthode de dimensionnement étaient toujours **supérieurs** d'environ **10%**, ce qui s'explique par ses coefficients de **sécurité** implicites. La distinction de la demande en oxygène pour le traitement du carbone et la nitrification suggère de plus que pour une boue nitrifiante, le terme usuel de respiration **endogène** représente non seulement une demande pour l'oxydation du carbone, mais aussi pour la nitrification de l'azote **intracellulaires**.

Par contre le calcul usuel est moins adapté que la simulation en **régime** transitoire (temps de pluie) car il ne tient pas compte des phénomènes d'accumulation temporaire dans la boue. Cette remarque peut être généralisée : l'approche usuelle des performances de traitement d'une station d'épuration à boue activée à l'échelle de la journée donne de bons **résultats** en **régime** pseudo-permanent, mais n'est plus valable en **régime** transitoire, car elle n'est pas fondée sur le bilan de masse. C'est par exemple **vrai** pour la notion de rendement journalier, qui donne une estimation de **l'efficacité** du traitement **réel** en **régime** pseudo-permanent, mais ne signifie plus rien en **régime** transitoire caractérisé (temps de pluie), car elle ne tient pas compte des possibilités de stockage ou de **déstockage** important de charge polluante dans les bassins.

## **Perspectives**

Le développement de la méthode de fractionnement pourrait être poursuivi, notamment en remplaçant la filtration par la coagulation-flocculation et éventuellement même en se limitant à un seul réacteur incubant de l'affluent brut. La méthode devra également être validée en comparant les résultats avec ceux obtenus par une méthode **respirométrique** pour les fractions **dégradables**.

Parallèlement l'évaluation de la nécessité et de la fréquence souhaitable de caractérisation en vue de simulations dynamiques est un point important à approfondir, par différentes approches :

- en poursuivant l'analyse de sensibilité sur les **résultats** de simulations, notamment concernant la **répartition** de la **DCO dégradable** entre SS et Xs et la **fréquence** de caractérisation, à **déterminer** selon le pollutogramme typique pour le temps sec, et selon le **déroulement** des événements pour le temps de pluie (début de pluie, vidange bassin, lavage bassin etc).
- en continuant l'évaluation de la **variabilité** temporelle du fractionnement sur un même site.
- en identifiant les facteurs de variation. du fractionnement d'un site à l'autre, pour aboutir éventuellement à une typologie du fractionnement en fonction de critères géographiques, météorologiques, des **caractéristiques** du réseau, du type de rejet, qui dispenserait d'une **détermination** expérimentale du fractionnement en première approche de **modélisation**.

Les résultats de fractionnement obtenus dans ce travail pourraient aussi être valorisés plus avant, avec le **modèle IAWQ n°3**. En effet, le fractionnement a **été** redéfini dans ce modèle par la filtration, ce qui correspond au protocole employé. Plus généralement, il serait très **intéressant** de comparer tous les **résultats** de simulation obtenus dans ce travail avec le modèle IAWQ **n°1** avec ceux que l'on obtiendrait avec le **n°3**, aussi bien pour le calage et la validation que pour les **scénarios prédictifs**. Ce genre d'étude pourrait contribuer à la validation et à la meilleure **compréhension/généralisation** de ce nouveau modèle, dont l'usage reste rare pour l'instant.

Les perspectives concernant les simulations de calage et validation porteraient sur la vérification **expérimentale** des valeurs des paramètres modifiées par rapport à leurs valeurs par défaut. Par exemple il serait simple de tenter de vérifier par des tests en réacteur fermé la **non-limitation** des cinétiques de **nitrification** par la concentration en ammoniacque et de dénitrification par la concentration en nitrates, sur de la boue de cette station puis d'autres sites.

Les perspectives liées aux simulations de scénarios de surcharges sont nombreuses. D'une part, certains pourraient aussi faire l'objet de **vérification expérimentale**. Par exemple il serait techniquement faisable de soumettre la station étudiée à une surcharge en **DCO** et en azote en utilisant les possibilités de stockage du bassin d'orage en tête, et à une surcharge simple en azote en **ajoutant** à l'affluent un sel **d'ammonium**.

Les **scénarios** à 10°C devraient faire l'objet d'acquisition de données préalable pour accroître leur **représentativité** : il s'agirait **d'étudier** l'effet d'une baisse progressive de température sur la population et la dynamique de croissance des autotrophes et des **hétérotrophes** sur un ou plusieurs sites pilotes et **réels, afin** de mieux **connaître** les coefficients de température à appliquer pour simuler le comportement d'une boue activée en **période** hivernale.

On **pourrait** également approfondir l'aspect optimisation du **séquençage** de l'aération, en comparant **différents réglages** des temporisations de son asservissement sur **rédox**. En effet **l'optimisation** de ces **réglages** sur site est en **général** fastidieuse et longue, en procédant par essai et erreur. La simulation pourrait être d'un grand secours dans ce domaine.

La comparaison de l'approche usuelle du fonctionnement et du dimensionnement des stations par des formules empiriques et par la simulation dynamique est un autre aspect à poursuivre, par exemple pour l'évaluation du flux **d'ammoniaque** assimilé, des vitesses **moyennes** de **nitrification** et **dénitrification**, des règles de dimensionnement de la zone d'anoxie etc.

Enfin il serait intéressant de **répéter** ce travail, en y **intégrant** les **améliorations suggérées**, sur une station fonctionnant 'déjà à pleine charge **et/ou présentant** des problèmes de traitement de l'azote en temps de pluie. Les simulations pourraient alors aider à identifier les causes exactes de la **dégradation** des performances qui sont parfois relatées dans la bibliographie, et à étudier les possibilités d'y **remédier**.