

# *Projet COMORE*

*Contrôle et Modélisation de Ressources Renouvelables*

*Sophia Antipolis*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'Activité*

2000



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>8</b>
6.1	Mathématiques de la modélisation . . . . .	8
6.2	Outils pour la modélisation en biologie . . . . .	8
6.3	Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques . . . . .	9
6.4	Modélisation de la croissance du plancton . . . . .	10
6.5	Modélisation et contrôle de procédés d'épuration biologique . . . . .	12
6.6	Modélisation et contrôle de procédés agroalimentaires . . . . .	13
6.7	Modélisation de la lutte biologique coccinelle/puceron . . . . .	13
6.8	Dynamique et contrôle de la pêche et de l'aquaculture . . . . .	13
6.9	Jeux dynamiques . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>14</b>
7.1	Traitement biologique des eaux usées . . . . .	14
7.2	Taxation de la pollution . . . . .	14
7.3	Observateurs grand gain . . . . .	14
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>14</b>
8.1	Actions nationales . . . . .	14
8.2	Actions européennes . . . . .	15
8.3	Actions internationales . . . . .	15
8.4	Visites et invitations de chercheurs . . . . .	15
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>15</b>
9.1	Animation de la Communauté scientifique . . . . .	15
9.2	Enseignement . . . . .	16
9.2.1	Thèses . . . . .	16
9.2.2	Stages . . . . .	17
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations . . . . .	17
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>18</b>

*COMORE est un projet commun avec le CNRS, ESA 7076/ Université P.M. Curie, Equipe Analyse et Simulation du Fonctionnement des Ecosystèmes (Station Zoologique, Villefranche sur Mer).*

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Jean-Luc Gouzé [DR Inria]

### Assistante de projet

France Limouzis [TR, à temps partiel dans le projet]

### Personnel Inria

Olivier Bernard [CR Inria]

Odile Pourtallier [CR Inria, à temps partiel dans le projet]

### Personnel CNRS

Claude Lobry [professeur à l'université de Nice-Sophia Antipolis, et ESA 7076, Villefranche-sur-Mer, à temps partiel, jusqu'à septembre]

Antoine Sciandra [DR ESA 7076, Villefranche-sur-Mer, à temps partiel]

Gilbert Malara [Ingénieur ESA 7076, à temps partiel]

### Chercheurs invités

Tewfik Sari [professeur à l'université de Mulhouse, en délégation à partir de septembre]

Asma Karama [Université de Marrakech, Maroc, novembre-décembre]

### Chercheurs doctorants

Julien Arino [bourse MESR, université de Grenoble]

Zakaria Hadj-Sadok [bourse franco-algérienne, université de Nice, jusqu'en février]

Valérie Lemesle [bourse MESR, UNSA, à partir de septembre]

Emilie Lefloc'h [bourse MESR, université de Marseille]

Ludovic Mailleret [bourse MESR, UNSA, à partir de septembre]

## Stagiaires

Vincent Gibaud [INAPG, février-mars]

Pierre Sigaud [INAPG, février-mars]

Marion Verdoit [Ifremer Nantes, mars]

Damien Eveillard [univ. PM Curie, février-juillet]

Abdelkader Khaddouri [univ. de Porto-Novo, Bénin, mai-juillet]

Ludovic Mailleret [Ecole Centrale Lille, mars-août]

Valérie Lemesle [UNSA, mars-juin]

Marylène Duffau [INSA Toulouse, juin-septembre]

## 2 Présentation et objectifs généraux

L'objectif global de Comore est d'appliquer des méthodes de l'automatique (régulation, estimation, identification, contrôle optimal, théorie des jeux) et de la théorie des systèmes dynamiques à la modélisation mathématique des ressources vivantes exploitées (ressources renouvelables), et à leur gestion. En collaboration avec des biologistes, nous construisons des modèles mathématiques de l'évolution temporelle de populations d'individus, les étudions, les validons, et nous appliquons des techniques de l'automatique pour réguler ou optimiser les systèmes biologiques.

Comore est un projet commun avec le CNRS, ESA 7076, Equipe Analyse et Simulation du Fonctionnement des Ecosystèmes (Station Zoologique, Villefranche sur Mer)

Axes de recherche :

- Mathématiques de la modélisation en biologie : étude mathématique de modèles, de leur comportement global.
- Outils pour la modélisation en biologie : validation des modèles, identification des paramètres.
- Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques : à partir des mesures et du modèle, on cherche à reconstruire les variables non mesurées.
- Modélisation et contrôle de la croissance du plancton en chémostat : le plancton est la base de la chaîne trophique dans les océans, et joue un rôle important dans le cycle du carbone (en rapport avec l'effet de serre). Nous étudions sa croissance dans un appareillage informatisé et automatisé, et validons des modèles.
- Modélisation, estimation et contrôle de bioréacteurs : les bioréacteurs, qui sont des écosystèmes microbiens en environnement contrôlé, ont de nombreuses applications industrielles, notamment en rapport avec l'agro-alimentaire et le traitement de l'eau.

- Dynamique et contrôle des écosystèmes, de la pêche : on modélise des écosystèmes (insectes, poissons) et on cherche par exemple des régulations optimales.
- Logiciels à usage des modélisateurs et des biologistes : on construit de petits logiciels spécifiques pour analyser des données biologiques.

Relations nationales, internationales et industrielles :

- Collaboration avec IFREMER (Nantes), INRA (Antibes, Biométrie Montpellier, LBE Narbonne), le Centre d'Océanologie de Marseille
- Participation au groupement national CoReV (Modèles et théories pour le Contrôle de Ressources Vivantes et la gestion de systèmes écologiques).
- Collaboration avec l'Ecole Polytechnique de Montréal (Canada), l'université de Louvain-la-Neuve (Belgique), l'université de Marrakech (Maroc), l'université de Twente (Hollande).

### 3 Fondements scientifiques

**Mots clés** : système dynamique, modélisation en biologie, ressources renouvelables, environnement, biologie, écosystèmes, optimisation, théorie des jeux, automatique non linéaire, bioréacteur, traitement de l'eau, épuration biologique, dynamique des populations, croissance de micro-organismes.

Le projet s'intéresse à la modélisation mathématique de systèmes biologiques, et plus particulièrement aux écosystèmes soumis à une action humaine (le cadre est donc celui des ressources vivantes renouvelables). Il est maintenant clair qu'il est important de savoir modéliser et contrôler l'exploitation de ces ressources par l'homme. Notre cadre de pensée est celui de l'Automatique <sup>[dNC94]</sup> : un système, décrit par des variables d'état, est soumis à des entrées (des actions sur ce système, que l'on maîtrise ou non), et est décrit par des sorties (les mesures possibles sur le système). Dans notre cas, le système sera l'écosystème, modélisé par un modèle mathématique (une équation différentielle le plus souvent, cf. <sup>[Mur90]</sup>). Ses variables d'état seront par exemple le nombre ou la densité de telle population. Les entrées pourront être les actions que l'on exerce sur l'écosystème : action de l'homme (effort de pêche, introduction de nourriture...) ou action d'un facteur extérieur (pollution, lumière, ...). Les sorties seront soit des produits que l'on peut récolter de cet écosystème (récolte, captures, production d'un produit...), soit des mesures que l'on utilise pour mieux savoir ce qui se passe dans l'écosystème (par exemple, la mesure d'une population).

Cette approche passe donc d'abord par la modélisation mathématique du système <sup>[Pav94]</sup>. Cette étape est fondamentale et difficile, car on ne dispose pas de lois rigoureuses comme en

- 
- [dNC94] B. D'ANDRÉA NOVEL, M. COHEN DE LARA, *Commande linéaire des systèmes dynamiques*, Masson, Paris, 1994.
- [Mur90] J. MURRAY, *Mathematical Biology*, Springer-Verlag, 1990.
- [Pav94] A. PAVÉ, *Modélisation en biologie et en écologie*, Aléas, Lyon, 1994.

physique. Il faut ensuite étudier les propriétés de ce système mathématique, et voir si, par sa structure, il a des propriétés particulières. Prenons un exemple simple mais fondamental : dans la réalité, les variables sont positives parce que ce sont des populations ; en est-il de même dans le système mathématique ?

On cherche donc à étudier le comportement qualitatif du système, l'existence de points d'équilibre, leur stabilité, l'existence de solutions périodiques... On souhaite montrer par exemple que pour toute condition initiale on ira vers un équilibre. Ces questions qualitatives sont fondamentales, car elles disent si le modèle est viable (le modèle ne prédit l'extinction d'aucune espèce, tout reste borné...) ou pas. Souvent, des problèmes spécifiques sont posés par l'origine biologique des modèles : des fonctions ou des paramètres sont mal connus, ou variables ; que peut-on dire sur le comportement du modèle ? Il est nécessaire de développer des techniques nouvelles pour étudier ces problèmes. De même, la structure forte des modèles permet de définir des grandes classes de systèmes, pour lesquelles on développe des techniques fines et adaptées : prenons pour exemple les modèles de type Lotka-Volterra en dimension  $n$ , qui décrivent les interactions deux à deux entre  $n$  espèces (proie-prédateur,...) [HS88].

Un problème fondamental est ensuite celui de la validation, ou de l'invalidation, des modèles : comment accepter, avec une certaine précision, un modèle en le comparant à des données expérimentales, parfois assez bruitées ? L'approche classique, qui consiste à identifier les paramètres du modèle en minimisant un critère d'écart entre la sortie mesurée et la sortie théorique, est souvent prise en défaut, car les mesures sont trop imprécises ; les fonctions intervenant dans la définition du modèle sont aussi parfois mal connues ; enfin, il est parfois difficile de décider, au vu de la sortie du modèle correspondant aux paramètres optimaux, s'il faut rejeter le modèle ou pas ; un critère numérique est porteur de peu d'information dans l'absolu. Nous avons donc développé des méthodes pour tenir compte de ces contraintes ; en particulier, nous cherchons des critères plus qualitatifs, permettant de conserver l'information qualitative initiale sur les modèles, et aussi de rejeter le modèle de façon certaine s'il ne peut rendre compte de certaines caractéristiques qualitatives visibles sur les données expérimentales.

Enfin, on se posera des problèmes de régulation (comment garder une variable à un niveau constant) et d'observation (comment reconstituer les variables d'état à partir des mesures) sur ces systèmes, en insistant surtout sur l'aspect observation (« capteur logiciel »), difficile pour les mêmes raisons que ci-dessus. Ces problèmes sont rarement classiques, parce que, encore une fois, l'origine « biologique » des systèmes apporte des contraintes. Un exemple simple est celui de l'effort de pêche, qui est une entrée (action de l'homme) sur un système (l'écosystème marin) : il est clair que l'effort sera toujours positif, et borné ; ces contraintes posent des problèmes mathématiques nouveaux.

Les domaines plus spécifiques où nous intervenons sont variés, mais unis par cette méthodologie de l'automatique. Nous allons du système en laboratoire très contrôlé (le chémostat) au système, très ouvert, de la pêche. Nous nous concentrons prioritairement sur les petits écosystèmes en environnement contrôlé.

---

– **Modélisation de la croissance du plancton marin en chémostat.**

---

[HS88] J. HOFBAUER, K. SIGMUND, *The theory of evolution and dynamical systems*, Cambridge University Press, 1988.

Nous travaillons en collaboration avec la station zoologique de Villefranche-sur-mer, qui a mis au point un chémostat (petit bioréacteur où des cellules se développent à partir d'un substrat) automatisé et géré par ordinateur ; ce système se prête donc particulièrement bien à l'application des méthodes issues de la théorie du contrôle. Le travail consiste à étudier et valider des modèles de croissance en continu pour le plancton soumis à un environnement variable (lumière, nourriture). La croissance du plancton est à la base de toute la production de la matière organique des océans ; cependant, les modèles classiques existants (Monod, Droop) révèlent leur insuffisance en environnement « trop » variable, c'est-à-dire qu'ils ont été validés expérimentalement seulement à l'équilibre <sup>[BO86]</sup>. Nous cherchons à obtenir des modèles valables pendant les phases transitoires, donc en dehors de l'équilibre ; ces modèles représenteront donc mieux le phénomène réel. Nous disposons à Villefranche de l'outillage expérimental et de l'expertise nécessaire pour entreprendre de nouvelles expériences suggérées par la théorie.

– **Modélisation du fonctionnement d'un bioréacteur. Observation et contrôle.**

Très naturellement, le thème ci-dessus débouche sur une problématique plus générale de modélisation de bioréacteurs de différents types (épuration d'eau par exemple) et des problèmes d'observation et de contrôle de modèles incertains <sup>[BD90]</sup>. Un capteur logiciel, ou observateur, est un système dynamique dont l'objectif est de reconstruire asymptotiquement les variables d'état du système. Il se fonde pour cela à la fois sur un modèle et sur des mesures partielles (sorties) du processus. Plusieurs types de capteurs logiciels non-linéaires sont développés (observateurs « grand gain », asymptotiques, ...).

Cependant, les modèles utilisés sont souvent mal connus, en partie au moins. Nous développons aussi des observateurs qui tiennent compte de ces incertitudes, en fournissant des intervalles d'estimation.

– **Modélisation de systèmes exploités (pêche, écosystèmes).**

L'échelle des problèmes change ici ; beaucoup de données sont peu ou mal connues. Nous nous posons surtout pour l'instant des problèmes méthodologiques : comment modéliser, chez les poissons, la relation stock-recrutement (la relation qui lie, en gros, les adultes au nombre de juvéniles qu'ils peuvent engendrer) <sup>[LL81]</sup> ? Comment optimiser le comportement d'une pêcherie vers un équilibre ? On pourra consulter <sup>[Tou97]</sup> pour un exposé de ces problèmes. De même, nous nous intéressons à la modélisation d'écosystèmes exploités par l'homme, tel que les serres dans le cadre de la lutte biologique.

– **Théorie des jeux, économie...**

- 
- [BO86] J. E. BAILEY, D. F. OLLIS, *Biochemical engineering fundamentals*, McGraw-Hill, 1986.  
 [BD90] G. BASTIN, D. DOCHAIN, *On-line estimation and adaptative control of bioreactors*, Elsevier, 1990.  
 [LL81] A. LAUREC, J.-C. LE GUEN, « Dynamique des populations marines exploitées – Tome I : Concepts et modèles », *Rapports scientifiques et techniques n° 45*, CNEXO (cf. Éditions de l'IFREMER), 1981.  
 [Tou97] S. TOUZEAU, *Modèles de contrôle en gestion des pêches*, thèse de doctorat, Université Nice-Sophia Antipolis, mars 1997.



Les problématiques d'exploitation des ressources débouchent naturellement sur des problèmes de théorie des jeux (plusieurs pêcheurs sur une même ressource...). En général, dans les problèmes issus de l'exploitation des ressources, les agents économiques ont des intérêts conflictuels, mais non opposés. On utilisera des modèles de jeux à somme non nulle, et le but principal est de calculer des équilibres non coopératifs <sup>[BO95]</sup>.

## 4 Domaines d'applications

**Mots clés** : bioréacteur, traitement de l'eau, modèles biologiques, capteur logiciel.

Les domaines d'applications interviennent naturellement dans notre cadre de travail, même si nous nous posons pour l'instant plutôt des problèmes méthodologiques. Le contrôle des bioréacteurs a des applications principalement en agro-alimentaire, en pharmaceutique ou en cosmétique, et dans l'environnement (épuration des eaux, traitements des déchets, expertise écologique) <sup>[BO86]</sup>.

Notre effort principal porte sur l'épuration biologique : face à l'impact écologique du développement urbain et de la croissance démographique, le souci de la préservation des écosystèmes et du milieu naturel entraîne un durcissement de la réglementation des rejets des stations d'épuration (cf. la directive européenne du 21 mai 1991 concernant le programme d'assainissement s'échelonnant entre 1998 et 2005). Parmi les différentes méthodes appliquées, le traitement biologique joue un rôle important : plusieurs procédés sont étudiés, comme les boues activées et la fermentation anaérobie.

Le premier objectif du travail concerne la modélisation du processus. La problématique est de trouver un modèle mathématique à la fois suffisamment complexe pour décrire les activités biochimiques importantes pouvant intervenir au cours du traitement biologique (croissance des micro-organismes, oxydation, nitrification, dénitrification, hydrolyse, sédimentation,...) et suffisamment simple pour permettre une étude rigoureuse (analyse théorique, identification des paramètres, estimation des variables,...).

Nous considérons ensuite les problèmes d'estimation pratique de paramètres, d'observation (capteur logiciel), de surveillance en ligne et de régulation. Nous collaborons avec l'INRA Narbonne (LBE) qui possède des pilotes expérimentaux.

## 5 Logiciels

Nous réalisons quelques logiciels, pour l'instant encore expérimentaux, d'aide à la modélisation et à la simulation de modèles mathématiques en biologie, et de traitement de données biologiques ; ces logiciels (citons par exemple un logiciel de lissage interactif) sont mis à disposition des biologistes. L'accent est mis sur le côté interactif et pratique. Des logiciels d'aide à l'étude des équations différentielles sont aussi développés.

---

[BO95] T. BASAR, G. OLSDER, *Dynamic Noncooperative Game Theory*, édition Seconde, Academic Press, 1995.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Mathématiques de la modélisation

**Participants** : Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry, Tewfik Sari.

**Mots clés** : modélisation en biologie, système dynamique, automatique non linéaire, modèles mathématiques en biologie.

C. Lobry et T. Sari ont travaillé sur une approche de type "perturbation singulière" de la question de la stabilité des systèmes. L'objectif est de trouver des conditions sur les systèmes (1) et (2) qui assurent la stabilité de systèmes composites du type :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y) \quad (1) \\ \dot{y} &= g(\lambda, x, y) \quad (2)\end{aligned}$$

lorsque (1) est asymptotiquement stable en  $x$  pour  $y = 0$  et (2) « converge de plus en plus vite vers 0 quand  $\lambda$  tend vers l'infini ». Le sens de cette dernière expression est bien compris lorsque  $g$  est linéaire par rapport à  $y$  ( $g(\lambda, x, y) = A(\lambda, x)y$ ), mais reste à préciser dans le cas général. On propose une formalisation de ces questions qui permet de généraliser le théorème de Tychonov. Ce dernier résultat a des applications dans la question des rétroactions et observateurs à grands gains. Un article est soumis [36].

C. Lobry a continué à considérer la théorie de certains automates cellulaires (voir [19]). En collaboration avec J-P. Allouche (LRI, Paris XI), il a poursuivi l'étude de l'automate "AVN" défini pour représenter l'évolution de successions de mosaïques végétales.

Nous travaillons à des problèmes concernant les modèles généralisés de Lotka-Volterra, qui sont en fait des systèmes différentiels polynomiaux à variables positives ; on cherche des méthodes pour étudier la stabilité globale ou pour décrire le comportement qualitatif, puis le réguler ([29]).

### 6.2 Outils pour la modélisation en biologie

**Participants** : Olivier Bernard, Jean-Luc Gouzé.

**Mots clés** : bioréacteur, modélisation en biologie, observateur, modèle incertain, analyse qualitative.

La modélisation en biologie pose le problème de l'adéquation entre le système réel et sa représentation mathématique. Lors de la phase de modélisation, l'étape de validation du modèle est capitale. Nous avons poursuivi le développement d'une méthode de validation dynamique robuste de modèles différentiels, qui utilise seulement le signe des éléments de la matrice jacobienne, et ne dépend donc pas de la formulation exacte des équations ni des paramètres. En effet, les modèles en biologie sont souvent mal connus, et on utilise seulement des hypothèses de monotonie de certaines fonctions.

On étudie alors la succession temporelle des extrema de chaque variable et leur position par rapport à une valeur de référence. Ce sont des renseignements qualitatifs assez faciles à obtenir, même quand il y a beaucoup de bruit sur les mesures.

Nous avons affiné l'analyse en combinant l'information sur la tendance des variables d'état et sur leur position par rapport à une valeur de référence [BGed]. On peut alors déterminer l'ensemble des états qualitatifs possibles et leur succession dans le temps. Par exemple, on montre que seuls 14 des 64 états qualitatifs possibles *a priori* sont compatibles avec la structure du modèle de Droop (un modèle classique en croissance du plancton). La dynamique qualitative est alors décrite de manière très fine par un graphe.

Nos recherches en collaboration avec le CESAME (Belgique) et A. Karama (Université de Marrakech, Maroc) portent sur des méthodes de modélisation hybride (équations différentielles - réseaux de neurones) des systèmes biologiques. L'idée consiste à intégrer dans le modèle les contraintes biologiques (respect des lois de conservation de la matière, positivité des variables) et les connaissances *a priori* sur le système (signes de certaines interactions, stabilité de certains équilibres). Le réseau de neurones intervient alors de manière beaucoup mieux maîtrisée dans une partie du modèle, et la large panoplie des outils dédiés à l'identification du réseau peut alors être utilisée (voir [31, 32]).

### 6.3 Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques

**Participants** : Jean-Luc Gouzé, M. Zakaria Hadj-Sadok, Olivier Bernard, Valérie Lemesle.

**Mots clés** : bioréacteur, automatique non linéaire, observateur, modèle incertain.

#### *Observateur à erreur bornée pour des bioréacteurs*

Nous nous sommes intéressés à une classe de bioréacteur où certaines fonctions de l'état sont mal connues, ce qui est souvent le cas en biologie.

Nous avons alors construit un observateur à erreur bornée pour une telle catégorie de systèmes. Il reconstruit ainsi les variables d'état non mesurées avec une erreur raisonnable dépendant de la connaissance du modèle et avec une vitesse de convergence plus ou moins ajustable.

Un tel observateur permet de lier les méthodes utilisées jusqu'à présent, à savoir l'observateur asymptotique, qui est construit lorsque certaines fonctions de l'état sont inconnues, et l'observateur grand gain, qui est construit lorsque le modèle est parfaitement connu.

L'observateur à erreur bornée est plus robuste au bruit que l'observateur grand gain et semble être plus rapide que l'observateur asymptotique si on l'ajuste correctement. Il nous reste à appliquer cette méthode à des données réelles, ce qui nous permettrait de nous rendre mieux compte des améliorations apportées par rapport aux techniques déjà utilisées, les simulations effectuées étant très encourageantes.

Les méthodes développées ici sont susceptibles de s'appliquer à des systèmes biologiques plus généraux en dimension plus grande.

---

[BGed] O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, «Global qualitative behavior of a class of nonlinear biological systems: application to the qualitative validation of phytoplankton growth models», *Artif. Intel.*, submitted.

### *Observateurs asymptotiques robustifiés*

Considérons un modèle général de bioréacteur, comportant des cinétiques mal connues. Les observateurs asymptotiques estiment des variables non mesurées en utilisant la détectabilité du système et en éliminant les cinétiques inconnues. Cependant, les observateurs asymptotiques fonctionnent en boucle ouverte. En effet, leurs estimations reposent sur les bilans de matière et ne sont pas corrigées en exploitant un écart entre des quantités mesurées et des quantités calculées par l'observateur. Cela suppose que le modèle de bilan de matière est parfait. Or il se peut que les paramètres de rendement soient mal estimés, ou que les entrées de matière dans le système soient mal connues. On a mis au point une méthode destinée à améliorer la robustesse de l'observateur vis-à-vis des incertitudes : on tire profit de sorties supplémentaires pour améliorer les performances de l'observateur asymptotique, qui n'utilise toujours pas de façon explicite les cinétiques inconnues. On montre que la vitesse de convergence peut être améliorée dans certaines directions, ainsi que la robustesse. L'application à des données simulées ou réelles est convaincante.

### *Observateurs par intervalles*

Avec Alain Rapaport (INRA Montpellier), nous avons poursuivi des travaux sur les observateurs par intervalles, en posant en particulier le problème de l'observabilité pratique : il arrive qu'un système incertain soit théoriquement instantanément observable, mais qu'on ne puisse pas construire un observateur classique. Nous avons étudié ensuite le cas où le système n'est plus observable : comment construire un observateur par intervalles qui gère au mieux ces incertitudes ? Nous décomposons alors les incertitudes suivant une certaine base, et obtenons des observateurs polytopiques qui encadrent les variables à estimer. Nous pensons qu'il y a encore de multiples améliorations possibles, pour gérer le bruit au mieux par exemple.

## **6.4 Modélisation de la croissance du plancton**

**Participants :** Olivier Bernard, Julien Arino, Jean-Luc Gouzé, Emilie LeFloch, Claude Lobry, Antoine Sciandra, Gilbert Malara.

**Mots clés :** bioréacteur, modélisation en biologie, croissance de microorganismes, dynamique des populations.

### *Etude expérimentale*

La problématique de la croissance phytoplanctonique contrôlée par une ressource variable a été abordée à travers une approche expérimentale visant à mesurer les principales variables réagissant à une variation de la ressource nutritive : la densité des algues unicellulaires en chémostat, leur taille, ainsi que la ressource. Le dispositif mis en place permet de contrôler l'apport de la ressource dans le temps suivant un mode périodique, et de mesurer à haute fréquence en sortie les variables précédentes.

Outre la variabilité des facteurs de croissance, le milieu marin est aussi caractérisé par leur concomitance. A une température donnée, la croissance du phytoplancton est essentiellement sous la dépendance de la lumière et des ressources nutritives. L'automate de culture de Villefranche-sur-Mer est également utilisé pour mesurer la croissance autotrophe de populations

soumises à des conditions d'éclairement et nutritives non optimales. In fine, ces mesures servent à construire et à valider des modèles plus réalistes. Dans le cadre du stage de D. Eveillard, une première structure mathématique a été proposée, qui prend en compte les principales caractéristiques physiologiques de la photoadaptation. Ce modèle prend en compte le fait que les facteurs externes agissent de façon couplée sur la croissance lorsqu'ils sont sub-optimaux, et non de façon indépendante, comme les modèles actuels le supposent.

Afin de tester l'effet d'un doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la calcification des coccolithophoridées, des expériences ont été menées en chemostat avec l'algue *Emiliana huxleyi*. Au cours de ces expériences, deux cultures ont été maintenues en cycles de lumière jour/nuit, l'une à une pression partielle en CO<sub>2</sub> correspondant à la pression actuelle, l'autre au double (scénario prévu pour 2021). Les premiers résultats semblent montrer que la production primaire subit peu d'influence de cette modification de l'environnement, et que la fixation du carbone dans les coccolithes modifie la teneur en carbone inorganique dissous. Des expériences complémentaires devront confirmer ces résultats.

#### *Validité des modèles de phytoplancton en régime dynamique*

La méthode d'analyse dynamique qualitative, développée au sein du projet, permet de détecter en ligne un changement dans la structure du système biologique. Elle a été appliquée dans le cadre de l'étude de la croissance algale en chemostat. Les observateurs qui avaient été développés pour le modèle de Droop et qui permettent, à partir d'une estimation de la biomasse, de reconstituer les sels nutritifs et les nutriments intracellulaires (quota interne), ont été utilisés avec succès pour des expériences où la source de l'élément limitant fluctue [14].

#### *Modèles structurés de la croissance du phytoplancton*

Disposant à Villefranche sur Mer de données décrivant l'évolution au cours du temps de la répartition des tailles de cellules dans un chemostat, nous étudions des modèles dits "structurés" de croissance dans le chemostat. Ces modèles décrivent la dynamique de la population en fonction de certaines caractéristiques, comme par exemple la taille. Dans la plupart des cas, les modèles utilisés pour cette description sont des systèmes d'équations aux dérivées partielles. Notre travail consiste à formuler et étudier des modèles structurés n'ayant pas recours au formalisme des EDP, de façon à pouvoir mieux comparer modèles et données.

Dans cette optique, nous avons étendu les résultats d'un précédent travail ([AGS00] et [33]) à des hypothèses biologiques plus réalistes. Le modèle proposé, en temps discret et structure discrète, décrit la dynamique d'une population planctonique. La description qui est faite du processus de division cellulaire est très détaillée : nous rendons compte de la division de cellules pour des tailles non nécessairement égales, de même que de la division en deux cellules de taille non identique. Ces processus sont de plus dépendants de l'environnement nutritif des cellules. En utilisant certaines propriétés du modèle, nous obtenons un résultat de stabilité globale. L'équilibre ainsi obtenu est ensuite comparé aux données expérimentales.

Par ailleurs, nous avons étudié [AG00] les propriétés d'une classe assez générale de modèles,

---

[AGS00] J. ARINO, J.-L. GOUZÉ, A. SCIANDRA, « A discrete, size-structured model of phytoplankton growth in the chemostat. Introduction of non constant cell division. », Soumis, 2000.

[AG00] J. ARINO, J.-L. GOUZÉ, « A size-structured, non conservative ODE model of the chemostat », Soumis, 2000.

continus en temps et discrets en structure. Ces systèmes non linéaires d'équations différentielles ordinaires rendent compte de la mortalité cellulaire dans le chémostat, de même que des activités de maintenance des cellules (*i.e.*, des activités consommatrices d'énergie mais non liées à la croissance ou à la division, comme par exemple la respiration). En considérant un nouveau système, consistant en une renormalisation du système d'origine, il devient possible de réduire l'influence de la non linéarité, et d'en déduire pour le système d'origine des résultats qualitatifs.

## 6.5 Modélisation et contrôle de procédés d'épuration biologique

**Participants** : Jean-Luc Gouzé, M. Zakaria Hadj-Sadok, Olivier Bernard, Ludovic Mailleret.

**Mots clés** : bioréacteur, automatique non linéaire, traitement de l'eau, épuration biologique.

En collaboration avec le CESAME (UCL, Belgique), et dans le cadre d'un projet européen (AMOCO, Agriculture and Fisheries), nous avons travaillé sur la modélisation et la reconstruction de l'état d'un fermenteur anaérobie destiné à traiter des déchets industriels (résidus de transformation du bois, vinasses, ...). Ce dispositif moderne possède un rendement épuratoire très élevé, ce qui permet en outre de traiter des déchets industriels difficiles à dégrader par des techniques classiques. Un tel procédé n'est cependant pas stable : plusieurs points d'équilibre existent, mais un seul est exploitable. En pratique, une surveillance continue et un contrôle permanent du système sont nécessaires, pour le stabiliser autour du point de fonctionnement intéressant. Le travail effectué ici a consisté tout d'abord à développer un modèle de ce procédé. Des procédures d'identification ont permis d'estimer les paramètres du modèle. Les simulations sont très proches des mesures, et le modèle reproduit correctement la déstabilisation du fermenteur observée. Des capteurs logiciels capables de tirer profit du peu de mesures disponibles pour estimer l'état interne du fermenteur (communautés bactériennes et différents substrats) ont été réalisés. Leurs prédictions sont très prometteuses [12], [BHSD<sup>+</sup>ed].

Nous avons cherché ensuite, après une étude fine de la dynamique et des bassins d'attraction, à concevoir des contrôleurs simples de mise en œuvre, robustes et basés sur le peu de mesures physiques disponibles en sortie du procédé.

L'étude a permis de décrire deux différents types de contrôleurs. Le premier est basé sur un algorithme qui contrôle le taux de dilution en fonction de tests directs sur l'état observé. Le second est un contrôle du taux de dilution par un retour de sortie plus classique mais permettant la disparition, dans les équations du modèle contrôlé, du taux de croissance des bactéries méthanogènes, à la base de l'instabilité. Ce contrôleur permet notamment de régler la demande chimique en oxygène (*i.e.* concentration en polluant) en sortie du fermenteur, même si la concentration en polluant en entrée varie.

---

[BHSD<sup>+</sup>ed] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, A. GENOVESI, J.-P. STEYER, «Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process», *Wat. Res.*, submitted.

## 6.6 Modélisation et contrôle de procédés agroalimentaires

**Participants** : Olivier Bernard, Zakaria Hadj-Sadok.

**Mots clés** : modélisation, procédé agroalimentaire, contrôle optimal.

Dans le cadre d'un projet européen FAIR (Agro Vanillin), et en collaboration avec Georges Bastin (CESAME, Louvain-La-Neuve), nous avons développé un modèle décrivant la croissance de champignons filamenteux et leur production de vanilline. Le modèle, fondé sur une analyse des flux de matière a été validé sur la base de 5 expériences de production de vanille en bioréacteurs [21]. L'analyse du modèle a, en outre, permis de mettre en évidence le rôle prépondérant de l'oxygène au cours de la biotransformation du précurseur en vanilline. L'objectif du projet est de produire la vanilline, et donc de maximiser une fonction profit. Le problème de contrôle optimal pour ce système non linéaire de dimension 8 s'avère difficile à traiter à l'aide des outils du contrôle optimal. Nous avons donc recherché des stratégies sous-optimales et développé les algorithmes de contrôle correspondants.

## 6.7 Modélisation de la lutte biologique coccinelle/puceron

**Participants** : Olivier Bernard, Jean-Luc Gouzé.

**Mots clés** : modélisation, écosystème, dynamique des populations.

L'équipe Entomologie et Lutte biologique du centre INRA d'Antibes étudie l'efficacité de la coccinelle *Harmonia axyridis* Pallas (Coleoptera : Coccinellidae) contre le puceron *A. gossypii* (Homoptera : Aphididae) en serres de concombres. Cette équipe dispose des infrastructures nécessaires aux expérimentations, en particulier de serres et pièces climatisées, et de nombreuses données sont disponibles. L'objectif de ce travail (collaboration entre l'INRIA, l'INRA et l'INLN) est d'améliorer l'efficacité du traitement biologique, en utilisant les outils de l'automatique et des systèmes dynamiques ; on a écrit un premier modèle mathématique de l'interaction coccinelle/puceron et on le valide sur les données de terrain. Outre l'aspect explicatif qui permettra de mieux comprendre le problème biologique à travers le modèle, on vise la mise au point des stratégies optimales de lâchers de coccinelles : on cherche le meilleur compromis entre le coût (nombre de coccinelles lâchées) et l'efficacité (le nombre de pucerons doit rester en dessous d'un seuil économiquement acceptable).

## 6.8 Dynamique et contrôle de la pêche et de l'aquaculture

**Participant** : Jean-Luc Gouzé.

**Mots clés** : pêche, ressources renouvelables.

Marion Verdoit, laboratoire MAERHA, IFREMER Nantes, poursuit une thèse à laquelle nous sommes associés sur le thème des modèles à temps discret de migration spatiale de populations marines exploitables. En particulier, nous avons commencé à développer un modèle pour la langouste.

## 6.9 Jeux dynamiques

**Participante** : Odile Pourtallier.

**Mots clés** : théorie des jeux, économie, politique environnementale.

En collaboration avec G. Mondello (LATAPSES, Sophia Antipolis), nous poursuivons l'étude des outils économiques de régulation des activités industrielles polluantes. L'objectif de cette étude est l'élaboration et l'analyse de modèles permettant une comparaison des performances relatives de politiques fiscales et de permis. Nous avons étudié un modèle qui compare l'effet de politiques fiscales dans des environnements concurrentiels différents (monopole, duopole, concurrence extérieure) sur le changement de technologie.

Ce travail se situe maintenant dans le cadre du programme de recherche PIREE (programme inter-institutionnel de recherches et d'études en économie de l'environnement).

On a poursuivi, avec S. Touzeau (INRA), l'étude d'un modèle de pêche liant les aspects biologiques de la ressource et les aspects économiques du secteur des pêcheries. Le modèle étudié considère les pêcheurs comme des agents en concurrence et dont d'objectif est de maximiser des performances économiques. Ces performances économiques sont directement reliées à l'état de la ressource et à la politique économique mise en place par un régulateur (l'État).

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Traitement biologique des eaux usées

Contrat européen FAIR AMOCO Advanced Monitoring and Control of the Operation of Waste-water treatment process (épuration des résidus d'une scierie).

### 7.2 Taxation de la pollution

Activités polluantes et régulations environnementales: étude comparative des performances respectives de la fiscalité et des permis d'émission. Programme inter-institutionnel de recherches et d'études en économie de l'environnement. Proposition spécifique : une fiscalité au service du développement durable. En collaboration avec le LATAPSES (UMR no 6564 CNRS) et le GREQAM (UMR no 9990 CNRS); durée 2 ans.

### 7.3 Observateurs grand gain

Financement du GDR Automatique pour un projet «Observateurs grand gain» coordonné par C. Lobry.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales

A. Sciandra est co-responsable de l'action DOREMI (Effet du Doublement de la pCO<sub>2</sub> sur le REseau microbien) dans le cadre du programme national du CNRS PROOF (PROduction



Océanique et Flux), qui finance le projet.

Le GDR CNRS 1107 (programme Environnement, Vie et Sociétés) « Outils et modèles de l'automatique dans l'étude de la dynamique des écosystèmes et du contrôle des ressources renouvelables », qui a été créé en 1994 par C. Lobry, est maintenant dirigé par R. Arditi (Orsay), sous le nom de COREV. COMORE est financé par ce groupement, et y participe activement.

Action incitative Color avec l'INLN (CNRS/UNSA) et l'INRA Antibes sur la modélisation de l'efficacité prédatrice des coccinelles sur les pucerons dans des serres (avec financement).

Comore est participant à deux projets du GDR Automatique, dirigés par C. Lobry et S. Diop.

Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry et Antoine Sciandra organisent un séminaire régulier « Étude et contrôle de modèles écologiques », à la station zoologique de Villefranche-sur-Mer ou à l'INRIA.

## 8.2 Actions européennes

O. Bernard coordonne du point de vue scientifique le montage d'un projet européen IST (avec des partenaires latino-américains) sur le contrôle à distance de stations d'épuration (responsable B. Le Dantec, ERCIM).

COMORE a participé à un projet européen FAIR Agrovanillin : « Design and scale-up of a bioprocess for the production of natural vanillin from agricultural by-products ».

## 8.3 Actions internationales

COMORE fait partie d'un projet de PICS franco-mexicain sur le thème « Automatique et environnement ».

Z. Hadj-Sadok effectue son post-doc à l'École Polytechnique de Montréal, au Canada, chez M. Perrier.

## 8.4 Visites et invitations de chercheurs

- A. Karama (univ. Marrakech, Maroc, 3 mois)
- S. Ben Miled (ENIT, Tunisie, deux semaines)
- C. Béné (Cemare, Angleterre, une semaine)
- J. Chattopaday (IST, Calcutta, une semaine)
- I. Vatcheva (univ. Twente, Hollande, une semaine)

# 9 Diffusion de résultats

## 9.1 Animation de la Communauté scientifique

Semaine de rencontres entre biologistes, mathématiciens et automaticiens à l'INAPG Grignon, 9-12 mai, conférenciers principaux :

Lou Gross (Dept of Mathematics et Dept of Ecology and Evolutionary Biology, univ. of Tennessee, Knoxville)

Pavel Kindlmann (Fac. Biological Sciences, Univ. of South Bohemia, Ceske Budejovice, Rép. Tchèque, actuellement professeur invité à l'INAPG)

C. Lobry est directeur du CIMPA (jusqu'en septembre), et maintenant détaché à l'INRA. Il est membre du comité scientifique Caulerpe du ministère de l'Environnement.

C. Lobry a été le responsable scientifique d'une école sur le thème "Modélisation en Ecologie" qui s'est déroulée à Abidjan (Côte d'Ivoire) du 20 au 24 Mars. C. Lobry est responsable de la rubrique "Mathematical Modeling" pour l' Encyclopedia of Life support Systems, éditée par l'UNESCO.

J.L. Gouzé fait partie du comité d'experts pour l'appel d'offre Aquae INRA/Cemagref ; il a fait un exposé grand public au CCSTI à Marseille.

O. Bernard est membre du comité d'organisation de CAB8.

O. Bernard et J.L. Gouzé ont rédigé deux chapitres d'un livre de cours à paraître sur le thème Automatique et bioréacteurs (D. Dochain éditeur).

Odile Pourtallier est membre du bureau exécutif de l'ISDG (International Society in Dynamic games).

## 9.2 Enseignement

J.L. Gouzé et O. Bernard ont organisé une semaine de cours sur les modèles mathématiques en biologie au DEA d'océanographie biologique de Pierre et Marie Curie, Paris VI. J.L. Gouzé a donné des cours de systèmes dynamiques (15 h) et O. Bernard a donné des cours de modélisation et TD(30h).

J.L. Gouzé a donné des cours de modélisation au DEA d'écologie d'Orsay (3h).

O. Bernard a donné des cours à Agro (maîtrise) (3 h), et au Sénégal : « Gestion des procédés de dépollution » (une semaine).

J. Arino a donné des cours de Statistiques du Magistère de Pharmacologie, UNSA, Février-Mars.

O. Pourtallier a participé à l'élaboration du module "optimisation" du mastère OSE (Optimisation des Systèmes Énergétiques) organisé par l'Edhec , l' École des Mines de Paris et le Creden.

### 9.2.1 Thèses

– Thèses en cours :

1. J. Arino, « Observation et contrôle de réacteurs biologiques ; application au chémostat », université de Grenoble
2. E. Lefloc'h, « Interaction lumière-nutriments sur la production des microalgues », université de Marseille
3. V. Lemesle, « Observateurs pour des systèmes dynamiques non-linéaires issus de la biologie », UNSA
4. L. Mailleret, « Méthodes de l'Automatique non-linéaire pour le contrôle d'écosystèmes en bioréacteur », UNSA

- Participation à des jurys de thèse : C. Lobry a fait partie des jurys d'HDR de C. Bacher et L. Doyen. J.-L. Gouzé a fait partie des jurys de la thèse d'A. Charef (univ. de Savoie), a été rapporteur pour l'HDR d'I. Queinnec (Toulouse) et J. Bestel (Dauphine).

### 9.2.2 Stages

- V. Gibaud et P. Sigaud, INAPG, février-mars, « Modélisation de l'interaction entre une population de pucerons et une population de coccinelles, dans le contexte de la lutte biologique »
- Marion Verdoit, Ifremer Nantes, mars, « Modèles discrets spatialisés de dynamique des populations »
- Damien Eveillard, février à juillet. DEA d'océanographie biologique de l'université Pierre et Marie Curie, Villefranche-sur-Mer, « Modélisation de l'effet conjugué de la limitation de l'azote et de la lumière sur la croissance autotrophe »
- Abdelkader Khaddouri, Univ. de Porto-Novo, Bénin, mai à juillet, « Etude des bioréacteurs forcés périodiquement »
- Ludovic Mailleret, EC Lille, DEA d'automatique et informatique Industrielle de l'USTL, mars à août « Analyse et contrôle d'un modèle de digestion anaérobie »
- Marylène Duffau, INSA Toulouse, juin à septembre, « Modélisation de l'interaction entre une population de pucerons et une population de coccinelles »
- Valérie Lemesle, DEA INLN UNSA, mars-juin, « Construction d'observateurs et d'estimateurs pour des modèles dynamiques non linéaires : application aux Bioréacteurs. »

### 9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Les conférences ayant donné lieu à *actes publiés* sont indiquées en bibliographie, et ne sont pas répétées ici.

Tout le projet a participé au séminaire du groupe Corev (voir 9.1).

C. Lobry a été conférencier invité au Congrès de l'Union Mathématique Africaine à PACOM 2000) à Cape Town (Afrique du sud) du 24 au 28 Janvier.

J. Arino et JL Gouzé ont participé à la conférence DESTOBIO 2000 (Deterministic and Stochastic modeling of Biointeraction), 23-27 août, université de Purdue, West Lafayette, USA.

O. Pourtallier a participé au neuvième congrès de l'ISDG, à Adelaide, Australie, en décembre.

O. Bernard a donné des séminaires à l'INRIA Grenoble et au COM de Marseille ; il a participé au colloque Mathocéan à Marseille, et à la conférence «Gestion des ressources halieutiques» à Marrakech.

Dans le cadre du GDR « Observateurs grand gain », le projet a participé à des réunions à Metz, Montpellier, et en a organisé à Nice.

## 10 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, «Transient behavior of biological loop models, with application to the Droop model», *Mathematical Biosciences* 127, 1995, p. 19–43.
- [2] O. BERNARD, G. SALLET, A. SCIANDRA, «Nonlinear observers for a class of biological systems. Application to validation of a phytoplanktonic growth model.», *IEEE Trans. Aut. Cont.* 43, 8, 1998, p. 1056–1065.
- [3] J.-L. GOUZÉ, «Structure des modèles mathématiques en biologie», *in : Analysis and optimisation of systems*, A. Bensoussan, J. Lions (éditeurs), Lecture Notes in Control and Information Sciences, 111, Springer-Verlag, p. 1152–1163, 1988.
- [4] J.-L. GOUZÉ, «Global behaviour of Lotka-Volterra systems», *Mathematical Biosciences* 113, 1993, p. 231–243.
- [5] J.-L. GOUZÉ, «Positivity, Space Scale, and Convergence towards the Equilibrium», *Journal of Biological Systems* 3, 2, 1995, p. 613–620.
- [6] C. LOBRY, A. SCIANDRA, P. NIVAL, «Effets paradoxaux des fluctuations de l'environnement sur la croissance des populations et la compétition entre espèces», *C.R. Académie des Sciences de Paris, Science de la Vie* 317, 1994, p. 102–107.
- [7] C. LOBRY, «Negative feedback and control of renewable ressources», *in : Environment, economics and their mathematical models*, J. Diaz, J. Lions (éditeurs), Masson, 1994.
- [8] G. MALARA, A. SCIANDRA, «A multiparameter phytoplanktonic culture system driven by microcomputer», *Journal of Applied Phycology* 3, 1991, p. 235–241.
- [9] A. SCIANDRA, J.-L. GOUZÉ, P. NIVAL, «Modelling the reproduction of *Centropages typicus* (Copepoda: Calanoida) in a fluctuating food supply», *Journal of Plankton Research* 12, 1990, p. 549–572.

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [10] H. ELMOZNINO, *Influence du cycle de vie individuel sur la dynamique spatiale d'une forêt mono-spécifique. Analyse à travers un automate cellulaire*, thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, 1999.
- [11] M. Z. HADJ-SADOK, *Modélisation et estimation pour les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes : application au traitement de l'eau*, thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, 1999.

### Articles et chapitres de livre

- [12] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, «Software sensors to monitor the dynamics of microbial communities: application to anaerobic digestion», *Acta Biotheo.*, à paraître.
- [13] O. BERNARD, M. POLIT, Z. HADJ-SADOK, M. PENGOV, D. DOCHAIN, M. ESTABEN, P. LABAT, «Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants. Software sensors and controllers for an anaerobic digester», *Wat. Sci. Tech.*, 2000, à paraître.

- [14] O. BERNARD, G. SALLET, A. SCIANDRA, «Use of nonlinear software sensors to monitor a culture of microalgae», *Oceanologica Acta*, 2000, à paraître.
- [15] L. CHEN, O. BERNARD, G. BASTIN, P. ANGELOV, «Hybrid modelling of biotechnological processes using neural networks», *Contr. Eng. Practice* 8, 2000, p. 821–827.
- [16] J. L. GOUZÉ, A. RAPAPORT, Z. HADJ-SADOK, «Interval observers for uncertain biological systems», *Ecological modelling* 133, 2000, p. 45–56.
- [17] M. Z. HADJ-SADOK, J. L. GOUZÉ, «Estimation of uncertain models of activated sludge process with interval observers», *Journal of Process Control*, 2000, à paraître.
- [18] A. KARAMA, O. BERNARD, D. DOCHAIN, A. BENHAMMOU, «Hybrid modelling of anaerobic wastewater treatment processes», *Wat. Sci. Tech.*, 2000, à paraître.
- [19] C. LOBRY, H. ELMOZNINO, «Combinatorial properties of some cellular automata related to the mosaic cycle concept», *Acta Biotheoretica*, 2000, à paraître.
- [20] A. SCIANDRA, L. LAZZARA, H. CLAUSTRE, M. BABIN, «Responses of the growth rate, pigment composition and optical properties of *Cryptomonas* sp. to light and nitrogen stresses», *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 201, 2000, p. 107–120.
- [21] C. STENTELAIRE, L. LESAGE-MEESSEN, J. ODDOU, O. BERNARD, G. BASTIN, B. COLONNA-CECCALDI, M. ASTHER, «Design of a fungal bioprocess for vanillin production from vanillic acid at scalable level by *Pycnoporus cinnabarinus*», *J. Biosc. Bioeng* 89, 2000, p. 223–230.
- [22] S. TOUZEAU, J.-L. GOUZÉ, «Regulation of a fishery: from a local optimal control problem to an “invariant domain” approach», *Natural Resource Modeling*, 2000, à paraître.

### Communications à des congrès, colloques, etc.

- [23] O. BERNARD, D. DOCHAIN, C. BONVILLAIN, D. BENYAMINA, M. SCHAEGER, A. PAUSS, «Dynamical modelling of a waste stabilisation pond, based on two-year intensive follow-up», *in: Proceedings of IAWQ Conference on Waste Stabilization Ponds*, Marrakech, Maroc, 1999.
- [24] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, «Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: II- Dynamical model development and identification», *in: Proceedings of Watermatex 2000*, Gent, Belgium, 2000.
- [25] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, J.-L. GOUZÉ, «Observers for the biotechnological processes with unknown kinetics. Application to wastewater treatment», *in: Proceedings of CDC 2000*, Sydney, Australia, 2000.
- [26] O. BERNARD, M. POLIT, Z. HADJ-SADOK, M. PENGOV, D. DOCHAIN, M. ESTABEN, P. LABAT, «Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: III-Software sensors and controllers for an anaerobic digester», *in: Proceedings of Watermatex 2000*, Gent, Belgium, 2000.
- [27] O. BERNARD, G. SALLET, A. SCIANDRA, «Use of nonlinear software sensors to monitor the internal state of a culture of microalgae», *in: Proceedings of the IFAC World Congress (CDROM)*, vol. L, Beijing, China, p. 145–150, 1999.

- [28] J.-L. GOUZÉ, O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, « Observers with modelling uncertainties for the wastewater treatment processes », *in: Actes du colloque Automatique et Environnement*, Nancy, France, 2000.
- [29] J.-L. GOUZÉ, « Dynamical behaviour of Lotka-Volterra systems », *in: Proceedings of the MTNS (CDROM)*, Perpignan, France, 2000.
- [30] A. KARAMA, O. BERNARD, D. DOCHAIN, A. BENHAMMOU, « Hybrid modelling of anaerobic wastewater treatment processes », *in: Proceedings of Watermatex 2000*, Gent, Belgium, 2000.
- [31] A. KARAMA, O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, A. BENHAMMOU, D. DOCHAIN, « Hybrid neural modelling of an anaerobic digester with respect to biological constraints », *in: Proceedings of IAWQ*, Paris, France, 2000.
- [32] A. KARAMA, O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, A. GENOVESI, A. BENHAMMOU, D. DOCHAIN, J.-P. STEYER, « Constraint integration in hybrid neural modelling: example of an anaerobic wastewater treatment process », *in: Proceedings of CIMASI*, Casablanca, Maroc, 2000.

### Rapports de recherche et publications internes

- [33] J. ARINO, J.-L. GOUZÉ, A. SCIANDRA, « A discrete, size-structured model of phytoplankton growth in the chemostat », *rapport de recherche n° 3963*, INRIA, 2000.
- [34] M. DUFFAU, « Modélisation d'un système proie-prédateur dans le cadre de la lutte biologique », *rapport de recherche*, Mémoire de stage, INSA Toulouse, 2000.
- [35] V. LEMESLE, « Construction d'observateurs et d'estimateurs pour des modèles dynamiques non linéaires: Application aux Bioréacteurs », *rapport de recherche*, DEA Turbulence et Systèmes Dynamiques, université de Nice-Sophia Antipolis, 2000.
- [36] C. LOBRY, T. SARI, « The peaking phenomenon and singular perturbations: an extension of Tikhonov's theorem », *rapport de recherche n° 4051*, INRIA, 2000.
- [37] L. MAILLERET, « Analyse et Contrôle d'un Modèle de Digestion Anaérobie », *rapport de recherche*, DEA Automatique et Informatique Industrielle, université de Lille 1; Mémoire de fin d'étude, Ecole Centrale de Lille, 2000.