

# *Projet COMORE*

*Contrôle et Modélisation de Ressources Renouvelables*

*Sophia Antipolis*

THÈME 4A



*R*apport  
*d'**A*ctivité

2001



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

*COMORE est un projet commun avec le CNRS, UMR 7093/ 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

Antoine Sciandra [DR UMR 7093, Villefranche-sur-Mer, à temps partiel]

Gilbert Malara [Ingénieur UMR 7093, à temps partiel]

### Chercheur invité

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

### Collaborateur extérieur

Claude Lobry [professeur à l'université de Nice et INRA]

### Ingénieur associé

Cédric Prévost [à partir d'octobre]

### Post-Doctorant

Woihida Aggoune [octobre à décembre]

### Chercheurs doctorants

Julien Arino [bourse MESR, université de Grenoble, jusqu'en février]

Valérie Lemesle [bourse MESR, UNSA]

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

Ludovic Mailleret [bourse MESR, UNSA]

Lionel Pawlowski [bourse MESR, université P.M. Curie, depuis septembre]

### Stagiaires

Olivier Croce [DESS université de Corte, mai-août]

Caroline Bidot [INSA Toulouse, février-juin]

Matthieu Fruchard [Ecole Centrale de Lille]

Lionel Pawlowski [DEA Océanographie biologique Paris VI]

Marion Verdoit [Ifremer Nantes, mars-décembre]

## 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 études, 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, UMR 7093, 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 : construction et 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 phytoplancton 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.
- Coordination scientifique du projet européen IST TELEMAR portant sur le contrôle de stations de dépollution biologique.
- 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 [dNC94] : 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. [Mur90]). 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 [Pav94]. Cette étape est fondamentale et difficile, car on ne dispose pas de lois rigoureuses comme en 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

---

[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.

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

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 (chémostat, bioréacteur,...)

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

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 phytoplancton 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 [BO86]. 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 [BD90]. 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 utilisées 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 d'éléments sont peu ou mal connus. Nous nous posons surtout pour l'instant des problèmes méthodologiques : comment modéliser,

---

[BO86] J. E. BAILEY, D. F. OLLIS, *Biochemical engineering fundamentals*, McGraw-Hill, 1986.

[BD90] G. BASTIN, D. DOCHAIN, *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, Elsevier, 1990.

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...**

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. 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, dédiés à l'épuration biologique des

- 
- [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.
- [BO95] T. BASAR, G. OLSDER, *Dynamic Noncooperative Game Theory*, édition Seconde, Academic Press, 1995.
- [BO86] J. E. BAILEY, D. F. OLLIS, *Biochemical engineering fundamentals*, McGraw-Hill, 1986.



vinasses. Nous sommes en contact (voir 7.1) avec des industriels dans le domaine de l'épuration biologique de résidus agro-alimentaires.

## 5 Logiciels

Nous réalisons quelques logiciels, pour l'instant encore expérimentaux, d'aide à la conception 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.

## 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. Une session sur ce thème a été organisée aux journées du GDR Automatique à Autrans [25].

Nous étudions une classe de systèmes différentiels linéaires par morceaux, qui interviennent notamment quand les interactions entre éléments d'un réseau biologique sont du type « à seuil ». Ces modèles sont très fréquemment utilisés dans les domaines des réseaux enzymatiques ou génétiques, et ont fait l'objet de nombreux travaux. Notre analyse utilise le concept de solutions de Filippov pour des équations à second membre discontinu. Nous montrons que l'étude des solutions singulières, sur les surfaces de discontinuité, est clarifiée, et nous étudions plusieurs exemples de réseaux génétiques [33].

## 6.2 Outils pour la modélisation en biologie

**Participants** : Olivier Bernard, Jean-Luc Gouzé, Lionel Pawlowski, Valérie Lemesle.

**Mots clés** : bioréacteur, modélisation en biologie, 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 [11]. 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.

### *Identification des modèles à bilan de matière*

En collaboration avec G. Bastin (CESAME, Belgique), nous avons élaboré une méthode pour déterminer le nombre de réactions biologiques qu'il faut prendre en compte pour espérer représenter un jeu de données par un modèle de bilan de matière. Nous avons également mis au point une méthode pour identifier la structure de la matrice stoechiométrique (termes positifs, négatifs et zéros).

### *Etude qualitative du comportement entrées-sorties à l'équilibre*

Pour valider la structure des modèles biologiques lorsqu'on ne connaît pas leur paramètres, nous avons étudié de manière qualitative, le comportement entrées-sorties à l'équilibre. Une fois les valeurs d'équilibre calculées, nous étudions comment celles-ci sont influencées par une augmentation ou une diminution des entrées. Nous comparons ensuite ces résultats théoriques aux observations expérimentales afin de valider les modèles [PBFSis].

### *Réduction de modèles*

Les modèles biologiques structurés sont parfois de grande dimension, ce qui rend leur étude difficile. Nous nous sommes donc intéressés aux différentes méthodes de réduction de modèle allant de l'agrégation parfaite de variables au système lent-rapide.

---

[PBFSis] L. PAWLOWSKI, O. BERNARD, E. L. FLOC'H, A. SCIANDRA, « Qualitative behaviour of a phytoplankton growth model in photobioreactor », *in: Proceedings of the IFAC World Congress*, Barcelona, Spain, soumis.

Nous avons considéré un modèle structuré en classe de taille où la croissance des cellules dépend de deux fonctions de croissance dépendant de la nourriture (une certaine fonction sur les premiers stades, une autre pour les suivants) et nous avons trouvé des conditions sur la structure du modèle pour pouvoir le réduire en prenant comme variables réduites des combinaisons linéaires des variables d'origine.

Le système réduit obtenu modélise la croissance d'une cellule en deux stades : un premier stade où elle grandit par une fonction de croissance dépendant de la nourriture et un deuxième où elle peut, par exemple, évoluer sans besoin de nourriture. Nous avons alors étudié ce système réduit et donné des conditions nécessaires pour avoir apparition d'un comportement oscillatoire local. Ces modèles rejoignent et généralisent des modèles utilisés pour la croissance du plancton (voir 6.4).

### 6.3 Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques

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

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

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

Nous nous intéressons à une classe de bioréacteurs 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.

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

#### *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 en partie, ainsi que la robustesse. L'application à des données simulées ou réelles est convaincante.

#### *Observateurs par intervalles*

En présence d'incertitudes sur le modèle, la construction d'un observateur d'état exact n'est en général plus possible ; néanmoins, dans le cadre des systèmes coopératifs, la connaissance des bornes dynamiques des incertitudes permet de construire des estimateurs par intervalles donnant des bornes dynamiques encadrant les variables d'état à estimer.

Pour améliorer ces estimateurs, nous considérons expérimentalement connue une forme de densité de probabilité de la répartition des paramètres incertains à l'intérieur des bornes dynamiques. En calculant l'image (ou une borne supérieure) de la densité de probabilité des paramètres par le flot, nous pouvons associer aux estimateurs des degrés de confiance, et ainsi avoir un encadrement plus intéressant de la variable à estimer, notamment en vue de la surveillance d'un bioréacteur.

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 Etude expérimentale et théorique de la croissance du plancton

**Participants** : Olivier Bernard, Julien Arino, Jean-Luc Gouzé, Emilie LeFloch, Antoine Sciandra, Gilbert Malara, Lionel Pawlowski, Cédric Prévost.

**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.

Nous développons un logiciel pour piloter et synchroniser les différents automates de culture et stocker les données dans une base. L'objectif du logiciel est de centraliser le pilotage des différents automates de culture qui jusqu'à présent ne communiquaient pas entre eux, de rassembler l'information récoltée et de la stocker dans une base de données. Enfin, ce logiciel devra permettre la mise en oeuvre des algorithmes de contrôle sur la base des diverses informations recueillies. La maquette du logiciel a été réalisée au cours du stage de DESS de Olivier Croce,

en TCL/Tk, la version définitive est en cours de développement. Ce logiciel est centré sur une base de données qui contient les paramètres des divers automates, et stocke les mesures recueillies par ces automates. Cette maquette a été testée sur l'automate de mesure des sels nutritifs. Cédric Prévost travaille maintenant sur la réalisation de la version finale.

Afin de tester l'effet d'un doublement de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la calcification des coccolithoridées, 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.

### *Modélisation*

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 de nutrition non optimales. In fine, ces mesures servent à construire et à valider des modèles plus réalistes. Un modèle mathématique a été proposé, 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. Ce modèle a été identifié et validé grâce à une méthodologie originale dans ce domaine (voir 6.2).

Nous étudions le couplage entre un modèle hydrodynamique simple de transport et le modèle biologique qui décrit la croissance du phytoplancton limitée simultanément par la lumière et l'azote. Nous avons étudié la distribution spatiale prédite à l'équilibre par le modèle couplé, et nous l'avons comparé à une étude où un modèle biologique classique (de type Monod) est utilisé pour décrire le phytoplancton.

### *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 [16].

### *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 cette optique, nous avons étendu les résultats d'un précédent travail ([AGS01]) 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 [AG01] les propriétés d'une classe assez générale de modèles, 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.

Nous considérons aussi des systèmes plus généraux où la croissance est décrite non plus par une mais par plusieurs fonctions d'assimilation du substrat (voir 6.2).

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

**Participants** : Jean-Luc Gouzé, Olivier Bernard, Ludovic Mailleret, Woihida Aggoune.

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

Dans le cadre du projet européen IST Telemac, nous travaillons sur la modélisation, la reconstruction de l'état et le contrôle d'un fermenteur anaérobie destiné à traiter des déchets agro-industriels (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 consiste 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 [2]. On envisage aussi de développer d'autres modèles valables au voisinage d'autres régimes de fonctionnement.

---

[AGS01] 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, 2001.

[AG01] J. ARINO, J.-L. GOUZÉ, « A size-structured, non conservative ODE model of the chemostat », Soumis, 2001.

Nous avons exhibé un contrôleur asymptotique pour un fermenteur anaérobie à lit fixe. Le contrôleur permet notamment de choisir le niveau de pollution escompté en sortie du bioréacteur, par l'intermédiaire du contrôle d'un équivalent biologique de cette pollution et même si celle-ci est variable en entrée du procédé. Des expériences ont été réalisées au LBE qui ont permis, notamment, de valider expérimentalement ces résultats.

D'autre part, nous nous sommes aussi intéressés à un modèle plus général de biotransformation en chaîne à  $n$  étapes : le substrat initial est transformé par des microorganismes en un produit intermédiaire, lui-même transformé par une seconde population et ainsi de suite  $n$  fois. Cette structure est celle de nombreux procédés d'épuration biologique (notamment ci-dessus avec  $n = 2$ ) mais décrit aussi bien un procédé de bioproduction. Il est intéressant d'étudier la généralisation du contrôleur à des modèles conservant cette structure générique. Des résultats concernant la convergence asymptotique de la variable contrôlée vers une consigne choisie ont été obtenus sous entrées variables.

## 6.6 Modélisation de la lutte biologique coccinelle/puceron

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

**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. 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). Ces problèmes de type calcul optimal deviennent vite difficiles : on a obtenu des résultats théoriques sur un modèle simple de type proie-prédateur, puis on a résolu numériquement le problème dans plusieurs cas de contrôle.

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

**Participants** : Jean-Luc Gouzé, Marion Verdoit.

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

La plupart des populations marines de poissons benthiques et démersales présentent des caractéristiques spatiales et saisonnières liées à leur cycle de vie annuel. Beaucoup de poissons migrent des zones de reproduction vers les zones de nutrition à certaines périodes de l'année. Malgré l'importance de ces aspects spatiaux et saisonniers, la plupart des modèles actuels de gestion ignorent fondamentalement cette structuration spatio-temporelle des ressources et la population est supposée se répartir au hasard sur toute l'aire de distribution et pendant toute

l'année.

Il semble cependant que la résolution du problème de la surexploitation pourrait être améliorée par l'adjonction de mesures de gestion plus fines, qui viseraient à rediriger l'effort de pêche selon les saisons et les compartiments spatiaux (par exemple par des fermetures de zones par saison). De telles mesures de gestion nécessitent d'une part une bonne connaissance des cycles biologiques des populations et d'autre part, des modèles structurés dans l'espace et dans le temps.

Le travail (en collaboration avec D. Pelletier, Laboratoire Maerha de l'IFREMER Nantes) a consisté à formaliser mathématiquement un modèle de la dynamique des divers stades démographiques d'une population marine exploitée, structuré dans l'espace et dans le temps, dans une perspective de gestion par zone et saison.

Cette modélisation est basée sur les résultats d'une analyse de données issues de campagnes expérimentales scientifiques et de la pêche commerciale <sup>[VPBis]</sup> et est appliquée à la population de merlan de la mer Celtique. Un formalisme en temps discret a été adopté pour l'écriture mathématique du modèle.

Le modèle considéré a deux saisons et deux compartiments spatiaux et est utilisé pour tester différents schémas d'allocation spatio-temporelle de l'effort de pêche ainsi que pour tester certaines hypothèses relatives, notamment, au maintien de l'abondance de la population à un niveau stable.

Une partie de l'étude consiste à identifier certains paramètres inconnus ou mal connus, et à réaliser une analyse de sensibilité du modèle à divers paramètres.

## 6.8 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.

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).

---

[VPBis] M. VERDOIT, D. PELLETIER, R. BELLAIL, « Characterizing the spatial and seasonal distribution of the whiting population in the Celtic Sea using commercial and scientific CPUE data », *ICES Journal of Marine Sciences*, 2001, soumis.



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

### 7.1 Traitement biologique des résidus agro-alimentaires

Le projet européen TELEMAT (Tele-monitoring and Advanced Tele-control of High-Yield Wastewater Treatment Plants) est coordonné par O. Bernard (Comore) sur le plan scientifique et B. Le Dantec (Ercim) sur le plan administratif.

Les partenaires sont ERCIM, INRIA COMORE, INRA (Laboratoire des Biotechnologies de l'environnement, Narbonne), APPLITEK (capteurs, Belgique), Department of Applied Mathematics, Biometrics and Process Control, Gent University, Belgique), Council for the Central Laboratory of the Research Councils (CCLRC), Information Technology Department, (Angleterre), SPES (Information technologies, Italie), University of Santiago de Compostela (USC)(Espagne), ENEA Waste water Treatment and Water Cycle Unit (Italie), AGRALCO (traitement des résidus alcooliques, Espagne), PSPc (Belgique), Tequila SAUZA S.A. (Mexique), The University of Guadalajara (UDG) (Mexique), ALLIED DOMEQC SPIRITS and WINE LTD. (DOMEQC UK), Allied Domecq Brasil Industria e Comercio Limitada (Brésil). Il s'agit de modéliser un procédé de traitement des rejets alcooliques par fermentation anaérobie, de le surveiller à l'aide de capteurs logiciels, de détecter des comportements anormaux, et de le contrôler, tout ceci à distance via Internet.

### 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.

## 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 Réseau 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).

Action incitative Color Hydrobio sur le couplage physique-biologie pour la croissance du plancton (avec financement).

O. Bernard est responsable du projet SEMPO financé par l'Action Bioinformatique commune à plusieurs établissements de recherches, qui implique aussi le Laboratoire d'Océanographie et Biogéochimie CNRS de Marseille. L'objectif du projet est de reproduire expérimentalement l'environnement de cellules phytoplanctoniques tel qu'il peut être rencontré en milieu marin.

Comore est participant à deux projets du GDR Automatique, dirigés par C. Lobry et S. Diop. Financement du GDR Automatique pour un projet « Observateurs grand gain » coordonné par C. Lobry et G. Sallet.

Jean-Luc Gouzé, Olivier Bernard 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 internationales

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

J. Arino effectue son post-doc chez P. van den Driessche (Dept Maths. and Stats) University of Victoria, Canada.

## 8.3 Visites et invitations de chercheurs

- C. Béné (Cemare, Angleterre, une semaine)
- H. de Jong (INRIA Helix, France, une semaine)
- I. Vatcheva (univ. Twente, Hollande, une semaine)
- D. Dochain (univ. Louvain, Belgique)

# 9 Diffusion de résultats

## 9.1 Animation de la communauté scientifique

Semaine de rencontres entre biologistes, mathématiciens et automaticiens à Agelonde, 28 mai-2 juin, conférenciers principaux Odo Diekmann (Utrecht) et F. Girard (INRA).

J.L. Gouzé fait partie du comité d'experts pour l'appel d'offre *Aquae* INRA/Cemagref, pour l'action Bioinfo.

Il est membre (suppléant) de la commission d'évaluation de l'INRIA.

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

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

## 9.2 Enseignement

J.L. Gouzé, O. Bernard et A. Sciandra 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(20h).

J.L. Gouzé et O. Bernard donnent des cours à l'ISIA (modélisation et contrôle des bioprocédés) (3 h et 12 h).

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

O. Bernard a donné des cours à l'INAPG (maitrise) (3 h), à l'ICTP de Trieste : "Modelling and control of bioprocesses", Summer school on control theory, à l'ENS Lyon, Ecole doctorale de maths. et info. fondamentale (3 h), à l'ENAT de Tunisie (16 h).

V. Lemesle enseigne en Deug MASS deuxième année (39 h).

L. Mailleret enseigne en DEUG Sciences de la Vie et de la Terre (42h), et en DEUG (MIAS) option Mathématiques et Informatique (39 h).

Odile Pourtallier a enseigné un cours d'optimisation et un cours de théorie des jeux dans le 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. E. Lefloc'h, «Interaction lumière-nutriments sur la production des microalgues», université de Marseille
2. V. Lemesle, «Observateurs pour des systèmes dynamiques non-linéaires issus de la biologie», UNSA
3. L. Mailleret, «Méthodes de l'Automatique non-linéaire pour le contrôle d'écosystèmes en bioréacteur», UNSA
4. L. Pawlowski, « Etude théorique et expérimentale de la croissance phytoplanctonique carencée par divers substrats », université P.M. Curie

– Participation à des jurys de thèse : J.-L. Gouzé a fait partie des jurys de la thèse de M. Maloum (UNSA), a été rapporteur pour V. Alcaraz (Perpignan), Verdier (Grenoble), Aboky (Metz), Madri (Lyon I). O. Bernard a fait partie des jurys de la thèse de V. Atthias (Toulouse) et I. Vatcheva (Twente, Pays-Bas).

### 9.2.2 Stages

- Olivier Croce, DESS univ de Corte, «Logiciel de pilotage d'un simulateur expérimental de milieu marin : cahier des charges, conception et développement d'une maquette ».
- Marion Verdoit, Ifremer Nantes, mars à décembre, « Modèles discrets spatialisés de dynamique des populations»
- Matthieu Fruchard, EC Lille, DEA d'automatique et informatique Industrielle de l'USTL, mars à août « Construction d'observateurs et d'estimateurs pour des modèles dynamiques non linéaires, en présence d'incertitudes : Application aux bioréacteurs »
- Caroline Bidot, INSA Toulouse, DEA Maths. Appli., juin à septembre, « Modélisation et commande optimale de l'interaction coccinelle/puceron dans le cadre de la lutte biologique »
- Lionel Pawlowski, DEA d'océanographie biologique de Pierre et Marie Curie, Villefranche-sur-mer, février-juillet, « Modélisation des effets conjugués azote/lumière sur la croissance phytoplanctonique : étude qualitative et validation »

### 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).

V. Lemesle a assisté au séminaire de la Société Française de Biologie Théorique qui s'est déroulé à Paris du 14 au 16 juin.

Odile Pourtallier a participé au NCCR-Climate WP4 Workshop on Climate Risk Assessment at Sils-Maria, Suisse, du 5 au 9 octobre.

## 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, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, A. GENOVESI, J.-P. STEYER, « Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process », *Biotech. Bioeng.*, 75, 2001, p. 424–438.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J.-L. GOUZÉ, « Global behaviour of Lotka-Volterra systems », *Mathematical Biosciences* 113, 1993, p. 231–243.
- [6] C. LOBRY, « Negative feedback and control of renewable ressources », in : *Environment, economics and their mathematical models*, J. Diaz, J. Lions (éditeurs), Masson, 1994.
- [7] G. MALARA, A. SCIANDRA, « A multiparameter phytoplanktonic culture system driven by microcomputer », *Journal of Applied Phycology* 3, 1991, p. 235–241.
- [8] 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

- [9] J. ARINO, *Modélisation structurée de la croissance du phytoplancton en chemostat*, thèse de doctorat, université Joseph Fourier, 2001.

### Articles et chapitres de livre

- [10] O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, *Estimation d'état, Automatique des bioprocédés*, Hermes Science, Paris, 2001, ch. 4, p. 87–120.
- [11] 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.*, à paraître.

- [12] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, A. GENOVESI, J.-P. STEYER, « Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process », *Biotech. Bioeng.*, 75, 2001, p. 424–438.
- [13] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, « Software sensors to monitor the dynamics of microbial communities : application to anaerobic digestion », *Acta Biotheoretica* 48, 2000, p. 197–205.
- [14] 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. Technol.* 43, 7, 2001, p. 175–182.
- [15] O. BERNARD, I. QUEINNEC, *Modèles dynamiques de procédés biochimiques. Propriétés des modèles, Automatique des bioprocédés*, Hermes Science, Paris, 2001, ch. 2, p. 23–52.
- [16] O. BERNARD, G. SALLET, A. SCIANDRA, « Use of nonlinear software sensors to monitor a culture of microalgae », *Oceanologica Acta* 24, 5, 2001, p. 435–442.
- [17] M. Z. HADJ-SADOK, J. L. GOUZÉ, « Estimation of uncertain models of activated sludge process with interval observers », *Journal of Process Control* 11, 2001, p. 299–310.
- [18] A. KARAMA, O. BERNARD, A. GENOVESI, D. DOCHAIN, A. BENHAMMOU, J.-P. STEYER, « Hybrid modelling of anaerobic wastewater treatment processes », *Wat. Sci. Technol.* 43, 1, 2001, p. 43–50.
- [19] A. KARAMA, O. BERNARD, J. GOUZÉ, A. BENHAMMOU, D. DOCHAIN, « Hybrid neural modelling of an anaerobic digester with respect to biological constraints », *Wat. Sci. Technol.* 43, 7, 2001, p. 1–8.
- [20] C. LOBRY, H. ELMOZNINO, « Combinatorial properties of some cellular automata related to the mosaic cycle concept », *Acta Biotheoretica* 48, 2000, p. 219–242.
- [21] S. TOUZEAU, J.-L. GOUZÉ, « Regulation of a fishery : from a local optimal control problem to an “invariant domain” approach », *Natural Resource Modeling* 14, 2, 2001, p. 311–333.

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

- [22] O. BERNARD, A. SCIANDRA, « Software sensor as a new tool to monitor the internal nitrogen quota of algae », in : *Proceedings of the American Society of Limnology and Oceanography (ASLO) conference*, Albuquerque, U.S. 12-16 Feb, 2001, 2001.
- [23] J.-L. GOUZÉ, V. LEMESLE, « A bounded error observer with adjustable rate for a class of bioreactor models », in : *Proceedings of the European Control Conference, ECC 2001*, Porto, Portugal, 5-7 Sept, 2001.
- [24] V. LEMESLE, J.-L. GOUZÉ, « A bounded error observer for a class of bioreactor models », in : *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Applications in Biotechnology, Modelling and Control of Biotechnological Processes*, Quebec, 24-27 June, 2001.
- [25] C. LOBRY, G. SALLET, « Session 11 : Grands gains et perturbations singulières des E.D.O », in : *Actes des journées nationales d’Automatique, avec des contributions de Lobry, Sallet, Aboky, Bernard, Gouzé, Sari, Rapaport, Vivalda*, Autrans, 31 Jan - 2 Fev, 2001.
- [26] L. MAILLERET, O. BERNARD, « A simple robust controller to stabilise an anaerobic digestion process », in : *Proceedings of computer applications in biotechnology-CAB8*, Quebec, 24-27 June, p. 213–218, 2001.
- [27] G. MONDELLO, O. POURTALLIER, « International Competition and Fiscal Policy : Some Assessments », in : *Colloque PIREE, Les Instruments des Politiques Environnementales*, Sophia Antipolis (France), April 2001.

- [28] A. RAPAPORT, J. GOUZÉ, « Polytopic Observers for Nonlinear Uncertain Systems », *in : Proceedings of the 5th IFAC Nonlinear Control Systems Design Symposium*, St-Petersburg, Russia, 4–6 July, 2001.
- [29] I. VATCHEVA, O. BERNARD, H. DEJONG, J.-L. GOUZÉ, N. MARS, « Discrimination of Semi-Quantitative models by experiment selection : method and application in population biology », *in : Proceedings of the IJCAI conference*, Washington, U.S. 4-10 Aug, 2001.
- [30] I. VATCHEVA, O. BERNARD, H. DEJONG, J.-L. GOUZÉ, N. MARS, « Discrimination of Semi-Quantitative models by experiment selection : method and application in population biology », *in : Proceedings of the Qualitative Reasoning conference*, San Antonio, U.S. 17-19 May, 2001.

### Rapports de recherche et publications internes

- [31] C. BIDOT, « Modélisation et commande optimale de l'interaction coccinelle/puceron dans le cadre de la lutte biologique », *rapport de recherche*, DEA Maths. Appli. INSA Toulouse, 2001.
- [32] M. FRUCHARD, « Construction d'observateurs et d'estimateurs pour des modèles dynamiques non linéaires, en présence d'incertitudes : Application aux bioréacteurs », *rapport de recherche*, EC Lille, DEA d'automatique et informatique Industrielle de l'USTL, 2001.
- [33] J.-L. GOUZÉ, T. SARI, « A Class of Piecewise Linear Differential Equations Arising in Biological Models », *rapport de recherche n°4207*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4207.html>.
- [34] L. PAWLOWSKI, « Modélisation des effets conjugués azote/lumière sur la croissance phytoplantonique : étude qualitative et validation », *rapport de recherche*, DEA d'océanographie biologique de P.M. Curie, 2001.