

Projet COMORE

Contrôle et Modélisation de Ressources Renouvelables

Sophia Antipolis

THÈME 4A



*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	2
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	3
4	Domaines d'applications	6
5	Logiciels	6
6	Résultats nouveaux	7
6.1	Mathématiques de la modélisation	7
6.2	Outils pour la modélisation en biologie	7
6.3	Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques	8
6.4	Modélisation de la croissance du plancton	9
6.5	Modélisation et contrôle de procédés d'épuration biologique	11
6.6	Modélisation et contrôle de procédés agroalimentaires	12
6.7	Dynamique et contrôle de la pêche et de l'aquaculture	12
6.8	Modélisation de la dynamique spatiale d'une forêt	12
6.9	Jeux dynamiques	13
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	14
7.1	Modélisation de la forêt tropicale	14
7.2	Traitement biologique des eaux usées	14
8	Actions régionales, nationales et internationales	14
8.1	Actions nationales	14
8.2	Actions européennes	15
8.3	Actions internationales	15
8.4	Visites et invitations de chercheurs	15
9	Diffusion de résultats	15
9.1	Animation de la Communauté scientifique	15
9.2	Enseignement	16
9.2.1	Thèses	16
9.2.2	Stages	16
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	17
10	Bibliographie	17

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]

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

Gilbert Malara [Ingénieur ESA 7076, à temps partiel]

Chercheurs invités

Asma Karama [Université de Marrakech, Maroc, juin à août]

Chercheurs doctorants

Julien Arino [bourse MESR, université de Grenoble]

Hervé Elmoznino [bourse Sylvolab, université de Nice, jusqu'à mai]

M. Zakaria Hadj-Sadok [bourse franco-algérienne, université de Nice]

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

Stagiaires

François Beauchamp [ENS Cachan, juin à août]

Alexandra Ramirez [ESSI, novembre à avril]

Allal Benmaazouz [ESSI, novembre à avril]

2 Présentation et objectifs généraux

Le projet Comore est un projet commun CNRS- université P.M. Curie- université de Nice-Inria, avec des membres de l'équipe Analyse et Simulation du Fonctionnement des Ecosystèmes (Station Zoologique, Villefranche sur Mer), l'accord avec le CNRS étant en cours de finalisation.

L'objectif global du projet est d'appliquer des méthodes de l'automatique (régulation, observation, identification, contrôle optimal, théorie des jeux) et de la théorie des systèmes dynamiques à la modélisation mathématique de ressources vivantes exploitées (ressources renouvelables) et à leur gestion.

Actuellement, le projet se concentre sur quelques sujets importants, qui vont du système biologique en laboratoire, comme la croissance des algues en chémostat ou la modélisation de bioréacteurs (où il est possible d'isoler le système, de contrôler les entrées...) aux applications comme la pêche ou la forêt, où beaucoup de choses ne sont pas ou sont mal connues, et où l'on maîtrise mal les entrées.

Ces recherches s'intègrent dans 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, a été dirigé par C. Lobry (univ. de Nice et station zoologique de Villefranche) et notre équipe, et est maintenant dirigé par R. Arditì (Ecologie, Orsay), sous le nom de COREV.

Ces recherches font aussi l'objet d'une collaboration avec le projet Inria Congé, dirigé par G. Sallet, à Metz, la station zoologique de Villefranche-sur-Mer (P. Nival, F. Carlotti), l'IFREMER de Nantes (Lab. MAERHA), l'INRA Montpellier (J.P. Vila, A. Rapaport), et l'INRA Narbonne (J.P. Steyer, J. Harmand).

3 Fondements scientifiques

Mots clés : système dynamique, modélisation en biologie, ressources renouvelables, environnement, optimisation, théorie des jeux, automatique non linéaire, bioréacteur.

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

[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.

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 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.

[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.

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 ou de la forêt.

– **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 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 [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 bioréacteur 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, forêt).**

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) [LL81] ? Comment optimiser le comportement d'une pêcherie vers un équilibre ? On pourra consulter [Tou97] pour un exposé de ces problèmes. De même, nous nous intéressons à la modélisation de la dynamique de la

-
- [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.
- [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.

forêt naturelle. Nous avons utilisé des modèles dynamiques spatialisés à base d'automates cellulaires pour reproduire et étudier les motifs spatiaux engendrés par les arbres.

– **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 [BO95].

4 Domaines d'applications

Mots clés : bioréacteur.

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, pharmaceutique ou en cosmétique, et dans l'environnement (épuration des eaux, traitements des déchets, expertise écologique) [BO86].

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 un rôle important, particulièrement le procédé des boues activées. D'autres procédés prometteurs (digestion anaérobie) sont aussi étudiés.

Le premier objectif du travail concerne la modélisation du processus (aérateur et décanteur). 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, de surveillance en ligne et de régulation.

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 dispo-

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

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

sition 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.

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

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.

C. Lobry (en collaboration avec S. Touhami et T. Sari, de Strasbourg) a étudié des systèmes à rétroaction lente ou rapide (feedback et observateurs grand gain dans la terminologie de l'automatique) dans le contexte des applications à la biologie. De nombreux modèles d'écosystèmes peuvent être analysés en termes de système entrée sortie soumis à une rétroaction dynamique. Il arrive que le temps caractéristique du processus biologique soit très différent de celui de la rétroaction, ce qui mathématiquement s'exprime par le fait qu'un certain paramètre est petit. Il est alors possible de mettre à profit la théorie des perturbations singulières pour réduire la dimension du modèle en négligeant les transitoires des processus rapides et en écrivant ce que les physiciens appellent des « états quasi stationnaires ». Nous avons étudié en particulier la convergence vers un équilibre pour des temps infinis [13].

C. Lobry a collaboré à un travail concernant des modèles dynamiques de l'ADN. L'évolution de la fréquence des nucléotides de l'ADN est représentée par un vecteur $X(t) = (A(t), T(t), G(t), C(t))$. On suppose classiquement que l'évolution de $X(t)$ est régie par une équation différentielle: $X'(t) = M(t)X(t)$ où $M(t)$ est une matrice qui dépend du temps, d'une forme particulière. La partie mathématique de [12] consiste à montrer que si les éléments de la matrice sont minorés par une constante strictement positive, lorsque t tend vers l'infini, les différences $A(t) - T(t)$ et $G(t) - C(t)$ tendent vers 0. Ce résultat s'obtient très facilement en utilisant des techniques de fonctions de Liapunov. Cette propriété permet de rejeter le modèle différentiel actuel car les observations contredisent cette conclusion.

C. Lobry et H. Elmoznino ont étudié les propriétés mathématiques d'un automate cellulaire inspiré de considérations sur la dynamique spatio temporelle des successions végétales. Ce travail montre que les résultats de simulation sont très sensibles aux propriétés arithmétiques des paramètres entiers qui définissent le modèle, et que les résultats de simulation de ces modèles doivent être interprétés avec la plus grande prudence (un article est soumis^[LE99]).

6.2 Outils pour la modélisation en biologie

Participants :

[LE99] C. LOBRY, H. ELMOZNINO, « Combinatorial properties of some cellular automata related to the mosaic cycle concept », *Acta Biotheoretica*, 1999, to appear.

Olivier Bernard, Jean-Luc Gouzé.

Mots clés : bioréacteur, modélisation en biologie.

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 étendu cette analyse à des systèmes soumis à des entrées périodiques [11]. Nous avons également considéré certaines classes de modèles à retard pour lesquels la dynamique qualitative peut encore être décrite en utilisant les arguments de l'analyse qualitative [SBed].

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 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 G. Bastin (CESAME, Belgique) et A. Karama (Université de Marrakech, Maroc) ont également porté sur des méthodes de modélisation hybride des systèmes biologiques [14]. 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 dédiée à l'identification du réseau peut alors être utilisée. Une publication est soumise [CBBAed].

6.3 Capteurs logiciels pour des systèmes biologiques

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

Mots clés : bioréacteur, automatique non linéaire, observateur.

Surveillance en ligne des systèmes biologiques

-
- [SBed] S. SOUSSI, O. BERNARD, « Identification of interactions in copepod populations using a qualitative study of stage structured population models », *J. Plank. Res.*, submitted.
- [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.
- [CBBAed] L. CHEN, O. BERNARD, G. BASTIN, P. ANGELOV, « Hybrid modelling of biotechnological processes using neural networks », *J. Process Contr.*, submitted.

Nous avons adapté les méthodes d'analyse dynamique qualitative à la surveillance en ligne d'un système biologique [11]. Nous supposons que des mesures de l'état du système sont disponibles à fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée. La comparaison directe des signaux ainsi recueillis et des états qualitatifs compatibles avec le modèle n'est en général pas possible, car le bruit perturbe trop fortement cette analyse. Nous avons donc filtré les signaux de mesure, en utilisant un filtre simple et indépendant du modèle et des paramètres du procédé : la moyenne mobile. Nous avons montré que les signaux filtrés respectaient également les règles de transition déterminées par l'analyse dynamique qualitative.

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 ([19]). Nous avons présenté par ailleurs un exposé introductif sur les observateurs par intervalles [GRHS99], et nous étudions le cas où le système n'est plus observable : comment construire un observateur par intervalles qui gère au mieux ces incertitudes ?

6.4 Modélisation de la croissance du plancton

Participants :

Olivier Bernard, Julien Arino, Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry, Antoine Sciandra, Gilbert Malara.

Mots clés : bioréacteur, modélisation en biologie.

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. Ces expériences montrent que le comportement d'un système biologique placé dans un environnement variable peut s'avérer plus complexe que s'il est placé dans un environnement stable. Le corollaire est que la modélisation des processus de croissance doit être adaptée au type de dynamique en vigueur, et notamment que les modèles validés à l'état stable ne sont pas forcément adaptés pour représenter la croissance dans un environnement variable.

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

[GRHS99] J. L. GOUZÉ, A. RAPAPORT, Z. HADJ-SADOK, « Interval observers for uncertain biological systems », *Journal of Ecological modelling*, 1999, submitted.

serviront à construire et à valider des modèles plus réalistes (en collaboration avec Cor Zonneveld (Frei Universiteit Amsterdam)). Ces modèles prendront 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.

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 chémostat. Nous avons ainsi pu montrer que les algues réagissent qualitativement différemment en fonction de la fréquence d'apport en nutriments. Pour des fréquences faibles, les modèles à structure de type Droop suffisent à décrire l'évolution du phytoplancton. Par contre, lorsque la période d'apport devient inférieure à la demie journée, les algues se synchronisent sur la source d'azote, et les règles de transition entre les états qualitatifs changent [11].

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 [17].

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 phytoplanctoniques dans un chémostat, nous étudions des modèles dits «structurés» de croissance dans le chémostat. Ces modèles décrivent la dynamique de la population en fonction de certaines caractéristiques, comme par exemple la taille.

Une première étude a concerné l'introduction de la division cellulaire non uniforme dans un modèle en temps discret. La plupart des modèles structurés existants supposent en effet que la division cellulaire a lieu pour une taille donnée, égale pour toutes les cellules. Nous nous basons sur le même type d'hypothèse que celle formulée dans [MD86]: la division a lieu pour une taille déterminée par une densité de probabilité. 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 nous intéressons à la formulation et à l'étude de modèles continus en temps, discrets en structure. La plupart des modèles structurés sont en effet décrits par des systèmes d'équations aux dérivées partielles (donc continus en structure) [MD86]. Nous essayons de caractériser des systèmes plus simples (en équations différentielles ordinaires), mais qui soient à même de rendre compte des mêmes caractéristiques que les modèles continus en la variable structurante.

Modélisation de populations zooplanctoniques structurées en stades

En collaboration avec Sami Souissi (ESA 7076, Villefranche-sur-mer), nous avons étudié des modèles de développement en stades d'une population de copépodes (microcrustacés marins)^[SBed]. Nous avons caractérisé la dynamique de cette population en utilisant les outils

[MD86] J. METZ, O. DIEKMANN, *The dynamics of physiologically structured populations, Lecture Notes in Biomathematics, 68*, Springer-Verlag, 1986.

[SBed] S. SOUISSI, O. BERNARD, « Identification of interactions in copepod populations using a quali-

de l'analyse qualitative développés pour ces systèmes à retard. Nous avons également étudié la dynamique qualitative de ces populations lorsqu'un prédateur en perturbait le développement. Nous avons alors montré que les chroniques expérimentales du dénombrement pouvaient être utilisées pour montrer que la population avait été perturbée, et pour déterminer des prédateurs potentiels.

6.5 Modélisation et contrôle de procédés d'épuration biologique

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

Mots clés : bioréacteur, automatique non linéaire.

Nous nous sommes intéressés aux problèmes d'estimation des variables pour un procédé de boues activées sous des contraintes d'incertitudes. Avec la collaboration d'Alain Rapaport de l'INRA de Montpellier, nous avons développé les observateurs à intervalles qui ont pour objectif de reconstruire les bornes supérieures et inférieures des variables non mesurables en incluant les estimations des valeurs maximales et minimales des variables ou des paramètres incertains. Ce type d'observateurs présente des applications intéressantes pour d'autres opérations, telle que la détection de pannes dans l'unité d'épuration où, souvent, il n'est pas nécessaire de reproduire les valeurs réelles de la variable non mesurable mais uniquement les valeurs limites.

Nous avons étudié ce problème sur un modèle simple incluant le substrat, la biomasse et la biomasse recyclée. Le but du travail était l'estimation des intervalles de variation des biomasses en utilisant les mesures du substrat. Différents cas ont été traités pour analyser l'influence des incertitudes des entrées ou des paramètres du modèle sur les résultats d'estimation, et nous avons aussi cherché à régler les gains de l'observateur en respectant les contraintes d'intervalles. La seconde étape de cette étude a concerné la synthèse des observateurs à intervalles à partir d'un modèle plus complexe incluant les dynamiques de l'oxygène dissout. L'objectif était l'estimation des concentrations des biomasses et du substrat en exploitant les mesures de l'oxygène dissout. On montre que dans ce cas on arrive à reconstruire asymptotiquement les concentrations réelles des biomasses indépendamment des incertitudes sur la concentration de l'influent en entrée du système d'épuration [HSG99].

En collaboration avec Denis Dochain (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, ...) [16, 15]. 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, afin de 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

tative study of stage structured population models », *J. Plank. Res.*, submitted.

[HSG99] M. Z. HADJ-SADOK, J. L. GOUZÉ, « Estimation of uncertain models of activated sludge process with interval observers », *Journal of Process Control*, 1999, A paraître.

du modèle. Les simulations sont très proches des mesures réelles, 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. Deux publications sont soumises ^[BHSDeda, BHSD⁺edb].

6.6 Modélisation et contrôle de procédés agroalimentaires

Participants : Olivier Bernard, Zakaria Hadj-Sadok.

Mots clés : modélisation, procédés agroalimentaires, 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 [10]. 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 ^[SLMO⁺ed]. 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 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, commence une thèse à laquelle nous sommes associés sur le thème des modèles à temps discret de migration spatiale de population de poissons.

6.8 Modélisation de la dynamique spatiale d'une forêt

Participants : Claude Lobry, Hervé Elmoznino.

Mots clés : forêt, ressources renouvelables.

-
- [BHSDeda] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, « Software sensors to monitor the dynamics of microbial communities: application to anaerobic digestion », *Acta Biotheo.*, submitted.
- [BHSD⁺edb] 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.
- [SLMO⁺ed] 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.*, Accepted.

Le modèle d'Usher est un modèle pour la dynamique d'une forêt où les arbres sont rangés en classes (en général de diamètre) et les lois de passage d'une classe à l'autre peuvent être dépendantes de la densité ou non. Ces modèles ne prennent pas en compte la situation spatiale des individus « arbre » ce qui est très simplificateur a priori. Toutefois il est possible qu'à une certaine échelle spatiale un effet de moyennisation gomme cette information et rende le modèle non spatialisé tout à fait opérationnel. C'est cette hypothèse qui a été explorée en prenant comme modèle spatialisé un modèle décrit par un automate cellulaire. Nous montrons qu'à une échelle suffisante (plus de 10 000 individus) un modèle d'Usher dont le recrutement est donné par une fonction non linéaire du nombre d'arbres matures donne une bonne approximation du modèle spatialisé.

6.9 Jeux dynamiques

Participante : Odile Pourtallier.

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

En collaboration avec G. Mondello (LATAPSES, Sophia Antipolis), nous avons étudié un problème où des firmes nationales, éventuellement en concurrence avec un importateur, doivent faire un choix de technologie de production. Nous avons pris le cas où le choix doit se faire entre une technologie polluante mais permettant de produire avec des coûts de production faibles et une technologie non polluante mais entraînant d'une part un investissement correspondant au changement de technologie et des coûts de production plus importants. Il est clair dans ce contexte que si l'on prend comme critère d'évaluation des firmes des critères économiques classiques les firmes nationales vont choisir la technologie polluante.

L'objectif du modèle étudié est d'analyser les moyens d'action d'un régulateur économique. Nous avons envisagé le recours pour le régulateur à différentes subventions et taxes. Nous avons étudié en particulier l'influence de la structure de concurrence (monopôle, duopôle (firme nationale plus importateur et duopôle national), duopôle national plus importateur) sur le niveau des taxes/subventions nécessaire au changement technologique.

À ce jour, les modèles dans le domaine de la gestion de la pêche se concentrent principalement sur l'évolution de la ressource, en prenant en compte la pression exercée par la pêche. Ceci est en particulier vérifié pour les pêcheries du nord de l'Europe, où la gestion par quotas sur la capture induit une modélisation centrée sur le stock exploité. À partir de ces modèles, l'optimisation classique consiste à maximiser le profit.

Néanmoins, le contexte en Méditerranée est bien différent. En effet, la gestion se fait par le biais de mesures techniques (limitation de l'effort de pêche) et économiques (subventions/taxes). Afin de pouvoir intégrer ces mesures de gestion, la modélisation de la pêcherie ne peut se faire du point de vue de la ressource uniquement, mais doit inclure une composante économique déterminant le comportement des pêcheurs. Du point de vue de l'optimisation et de la théorie des jeux, cette situation peut être décrite comme une ressource exploitée par plusieurs agents en concurrence dont l'objectif est de maximiser des critères économiques. Les performances économiques de ces agents sont influencées d'une part par l'évolution de la ressource, et d'autre part par la politique économique mise en place par un régulateur (état). En collaboration avec S. Touzeau (Institut de Ciències del Mar, CSIC Barcelone, Espagne), nous

avons modélisée une situation où interagissent une pêcherie et un régulateur. Le régulateur fixe un certain nombre de données économiques et cherche à préserver la ressource ainsi que le secteur pêche. Ses objectifs sont à long terme. La pêcherie est uniquement intéressée par ses performances économiques à court terme. La résolution du jeu modélisant cette situation ne peut pas se faire de façon analytique. Nous avons développé des algorithmes de simulation, permettant, pour une paire de stratégies (Pêcherie-Régulateur) de calculer d'une part l'évolution de la ressource et des variables économiques et d'autre part les fonctions d'évaluation des joueurs. La méthodologie adoptée est alors de résoudre un jeu matriciel permettant de déterminer des stratégies optimales (au sens de Stackelberg) dans un ensemble fini de stratégies raisonnables pour chacun des joueurs.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Modélisation de la forêt tropicale

Programme d'action avec le GIS Sylvolab (objet : coordination de l'étude de la forêt amazonienne par les divers organismes scientifiques présents en Guyane, principalement ORSTOM, CIRAD, ENGREF, CNRS).

Financements : organismes participants, financements locaux. La bourse de thèse de H. Elmoznino est financée par Sylvolab.

7.2 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 usine à bois).

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

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.

Financement (coordinateur R. Arditi, Orsay) du CNRS en réponse à l'appel d'offres « Méthodologies et pertinence d'indicateurs d'interactions population humaine-milieu », sur le thème « Modélisation de communautés aquatiques ».

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

COMORE et le laboratoire CESAME (Louvain, Belgique) participent à un projet Tournesol sur le thème des bioréacteurs.

COMORE a déposé un projet de coopération Van Gogh avec Cor Zonneveld et son équipe (Frei Universiteit Amsterdam).

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

8.3 Actions internationales

COMORE a proposé un projet INTAS « Active migration in trophic communities: biological phenomena, mathematical models and application » coordonné par R. Ardit (Orsay).

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

8.4 Visites et invitations de chercheurs

M. Perrier (Ecole Polytechnique, Montréal, Québec, une semaine en décembre)

C. Zonneveld (Frei Universiteit Amsterdam, deux jours en mars)

G. Bastin (CESAME, Louvain-la-Neuve, une semaine en octobre)

A. Karama (Univ. Marrakech, Maroc, 3 mois)

Bui Ta Long (Institute of Applied Mechanics, Hochiminh, Vietnam, 12-17 avril)

Suzanne Touzeau (Institut de Ciències del Mar, CSIC Barcelone, Espagne, deux semaines en avril et en novembre)

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la Communauté scientifique

Semaine de rencontres entre biologistes, mathématiciens et automaticiens du 14 au 17 avril au CIRM de Luminy (Centre International de Rencontres Mathématiques) à Marseille, dans le cadre du groupement COREV ; conférenciers principaux O. Arino (Pau), A. Franc (Paris), Shigui Ruan, Dalhousie University, Halifax, Jean Clobert, CNRS, Université Paris 6.

Rencontre au Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (INRA Narbonne) et au laboratoire de Biométrie (INRA Montpellier), du 26 au 29 avril.

C. Lobry fait partie des comités d'experts : Comité Méthodes, Modèles et Théories, programme Environnement, Vie et Sociétés CNRS, Comité d'Orientation de Programme Environnement du CEA. Il est directeur du CIMPA. Il est membre du comité scientifique Caulerpe du ministère de l'Environnement.

J.L. Gouzé fait partie des jurys de recrutement au Cemagref, et du comité d'experts pour l'appel d'offre Aquae INRA/Cemagref.

Odile Pourtallier est coprésidente du comité scientifique du « 8 ème symposium de théorie des jeux » de l'ISDG qui s'est tenu à Maastricht (Hollande) du 5 au 8 juillet, et membre du bureau exécutif de l'ISDG (International Society in Dynamic games).

9.2 Enseignement

J.L. Gouzé 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 A. Sciandra a donné des cours de modélisation (15 h).

J.L. Gouzé a donné des cours de modélisation au DEA d'écologie d'Orsay et à Agro (maîtrise) (6 h).

Odile Pourtallier a assuré un cours (15 heures) de théorie des jeux à la 3ème année d'IUP économique (UNSA), ainsi qu'un cours (15h) de théorie des jeux dynamiques au DEA d'économie de l'UNSA, un cours (12 h) d'optimisation au DESS IMAFA de l'UNSA. Elle a en outre assuré les travaux pratiques d'informatique dans les classes préparatoires du lycée international de Valbonne.

O. Bernard a assuré des T.D. (9h) au DEA d'océanographie biologique de Pierre et Marie Curie, Paris VI.

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.

– Thèses soutenues :

1. H. Elmoznino, «Modèles de la dynamique spatiale d'une forêt naturelle», université de Nice-Sophia Antipolis, soutenue le 10 mai.
2. M.Z. Hadj-Sadok, «Modélisation et estimation pour les bioréacteurs : prise en compte des incertitudes», université de Nice-Sophia Antipolis, soutenue le 14 décembre.

– Participation à des jurys de thèse : J.L. Gouzé et C. Lobry ont fait partie du jury de la thèse de Elmoznino. J.L. Gouzé a fait partie du jury de la thèse de Hadj-Sadok, et a été rapporteur de la thèse de A. K. Ghosh (Calcutta, Inde). C. Lobry a été rapporteur de la thèse de M.A. Moravie (Lyon), de l' H.D.R. de C. Bacher (Ifremer) et dans le jury de l' H.D.R. de M. Canalis (Univ. Marseille).

9.2.2 Stages

- François Beauchamp, ENS Cachan, juin à août, « Modélisation de la croissance du phytoplancton en chémostat»
- Alejandra Ramirez, ESSI, novembre à avril, « Logiciel de lissage interactif de données biologiques»
- Allal Benmaazouz, ESSI, novembre à avril, « Logiciel de lissage interactif de données biologiques»

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Les conférences ayant donné lieu à *actes publiés* sont indiquées en bibliographie.

Odile Pourtallier a participé au Workshop de l'ISDG qui s'est tenu à Ischia, Italie, du 17 au 21 juillet 1999, elle y a présenté un travail commun avec Mabel Tidball (INRA, Montpellier) et Francesco Moresino (Université de Genève), "Using Viscosity Solution for Approximations in Piecewise Deterministic Control Systems".

Odile Pourtallier a été invitée au CSIC -ICM (Institut de Ciències del Mar) de Barcelone par Suzanne Touzeau et Jordi Leonart durant 10 jours en novembre.

J.L. Gouzé a participé à la conférence «Theory and Mathematics in Biology and Medicine», Amsterdam, juillet, et a donné un séminaire à l'INRIA Rocquencourt.

J. Arino a participé à :

- 6 au 19 Juin 1999. Ecole d'été européenne, «Mathematics of Cell Physiology and Proliferation», Termoli (Italie). Présentation de «A structured, discrete model of phytoplankton growth in the chémostat. Comparison with experiments».
- 29 Juin au 3 Juillet 1999. Troisième conférence internationale «Theory and Mathematics in Biology and Medicine», Amsterdam. Présentation de «Size structured models for the chémostat; comparison with experiments».

O. Bernard a participé aux conférences :

- IFAC world congress, 5-9 juillet 1999, Pékin (Chine)
- Séminaire annuel de la société Française de biologie théorique, 14-16 juin 1999, Saint Flour (France)
- Journées PROOF-JGOFs France, 23-24 septembre 1999, Toulouse (France)

O. Bernard a donné des séminaires durant son séjour au Mexique, dans les universités de Guadalajara, de Xalapa ainsi qu'au CINESTAV (du 15 au 18 mars 1999). Il a également présenté des séminaires à Norwich (Angleterre) et Milan (Italie) dans le cadre du projet européen FAIR AgroVanillin.

C. Lobry a donné des conférences invitées à :

- Journées de l' «Association Française de Biologie Théorique» 14-16 Juin, St Flour.
- Congrès ICIMAF, La Havane, Cuba : 22-27 Mars
- Journées des Doctorant en Automatique : Nancy, 20-22 Septembre

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

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.

Articles et chapitres de livre

- [10] O. BERNARD, G. BASTIN, C. STENTELAIRE, M. ASTHER, « Mass balance modelling of vanillin production from vanillic acid by cultures of the fungus *Pycnoporus cinnabarinus* in bioreactors », *Biotech. Bioeng.* 1999, p. 558–571.
- [11] O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, « Nonlinear qualitative signal processing for biological systems: application to the algal growth in bioreactors », *Math. Biosciences* 157, 1999, p. 357–372.
- [12] C. LOBRY, J. LOBRY, « Evolution of DNA base composition under the no-strand bias conditions when the substitution rates are not constant », *Mol. Biol. Evol.* 16, 1999, p. 719–723.
- [13] C. LOBRY, T. SARI, S. TOUHAMI, « Fast and slow feedback in systems theory », *Journal of Biological Systems* 7, 3, 1999.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [14] O. BERNARD, G. BASTIN, P. ANGELOV, « Hybrid modelling of biotechnological processes using neural networks », in : *Proceedings of the IFAC World Congress (CDROM), vol. O*, Beijing, China, p. 469–474, 1999.
- [15] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, A. GENOVESI, « Développement de capteurs logiciels pour le suivi d'un procédé de traitement d'eau usée par digestion anaérobie », in : *Proceedings of annual seminary of the SFBT*, St Flour, France, p. 10, 1999.
- [16] O. BERNARD, Z. HADJ-SADOK, D. DOCHAIN, « Dynamical modelling and state estimation of anaerobic wastewater treatment plants », in : *Proceedings of ECC99 (CDROM)*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [17] 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.
- [18] M. Z. HADJ-SADOK, J. L. GOUZÉ, « Comparison between two interval observers for wastewater treatment models », in : *Proceedings of the European Control Conference ECC99 (CDROM)*, Karlsruhe, Germany, 1999.

- [19] A. RAPAPORT, J. GOUZÉ, « Practical observers for uncertain affine outputs injection systems », *in : Proceedings of ECC99 (CDROM)*, Karlsruhe, Germany, 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [20] C. LOBRY, « Modèles Dynamiques Déterministes en Ecologie », *85 pages*, cours d'une école du CIMPA, 1999.