

Rapport INRIA 1994 — Programme 5

Mathématiques et Informatique de
l'Automatique et de l'Optimisation pour
l'Utilisateur

PROJET MIAOU

3 mai 1995

PROJET MIAOU

Mathématiques et Informatique de l'Automatique et de l'Optimisation pour l'Utilisateur

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés : algorithme d'optimisation (21), approximation (1, 3), automatique (3, 21), automatique non linéaire (1, 12, 13), commande (1, 12), commande optimale (21), environnement (1, 15), feedback non linéaire (1, 13), identification de matrice de transfert (1, 3, 21), jeu dynamique (1), logiciel numérique (22), modélisation de système dynamique (22), modélisation en biologie (1, 15), modélisation en économie (22), optimisation (1, 3), planification de trajectoire (21), stabilisation de système non linéaire (1, 12), système dynamique (1), système mécanique non holonome (1, 12).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Laurent Baratchart, directeur de recherche, Inria

Secrétariat

France Limouzis

Chercheurs INRIA

Pierre Bernhard, directeur de recherche, à temps partiel
Jean-Luc Gouzé, chargé de recherche
Juliette Leblond, chargée de recherche, à temps partiel
Martine Olivi, chargée de recherche, à temps partiel
Jean-Baptiste Pomet, chargé de recherche
Odile Pourtallier, chargée de recherche
Franck Wielonsky, ingénieur de recherche

Personnel extérieur

Claude Lobry, Université de Nice

Chercheurs invités

Mabel Tidball, Université de Rosario, Argentine, en janvier
et à partir du 15 mai
Edward Saff, Université de Floride du sud (Tampa), USA, à
partir de septembre
Tamer Basar, Université de l'Illinois, Urbana, USA, à partir
de septembre
Andrea Gombani, LADSEB, Padoue, It., de janvier à mars
et en juin-juillet

Chercheurs post-doctorants

Marie-Paule Istace, Université de Namur, Belgique, à partir
d'octobre
Zhong-Ping Jiang, Ecole des Mines, jusqu'en avril
Joachim Rudolph, Univ. de Stuttgart, à partir de novembre

Chercheurs doctorants

Pascale Fulcheri, bourse MESR, Université de Nice puis
bourse INRIA depuis le premier juin 1994
Alain Rapaport, bourse DRET, Ecole des Mines, jusqu'en
octobre
Fabien Seyfert, bourse DRET, Ecole des Mines, à partir
d'octobre, co-encadré avec le CMA, EMP
Nabil Torkhani, bourse INRIA-Ponts, Ecole des Ponts
Suzanne Touzeau, bourse MESR, Université de Nice

Stagiaires

Lionel Delrieu, Maitrise Info. Univ. Nice
Karim Chaouache, fin d'études, Ecole Centrale de Paris
Arnaud Fahri, Ecole des Mines de St Etienne, 2ème année

Julien Maerfeld, Maitrise Info. Univ. Nice
Hervé Elmoznino, Maths.Info., Université de Nice
Philippe Laurent, ESSI 3ème année, option CSI

2 Présentation du projet

L'objectif du projet est de concevoir et de développer des méthodes effectives en analyse des systèmes dynamiques et en optimisation. Les thèmes développés à ce jour sont essentiellement :

- L'approximation dans le domaine complexe et ses applications à l'identification des systèmes dynamiques linéaires.
- La structure et le contrôle de systèmes dynamiques non-linéaires, en particulier la stabilisation de systèmes non-holonomes.
- Les jeux dynamiques, la commande optimale et la commande robuste.
- La modélisation et le contrôle de systèmes écologiques, notamment dans le cadre de la gestion des ressources renouvelables et de l'environnement. Cette activité est en cours de restructuration afin de devenir un projet indépendant.

3 Actions de recherche

3.1 Identification harmonique et approximation de matrices de transfert

La détermination d'un modèle quantitatif à partir de données expérimentales est un problème fondamental en sciences appliquées qui porte, en traitement du signal et en automatique, le nom d'identification. Une littérature énorme et de nombreux logiciels existent aujourd'hui en identification paramétrique, où le paradigme consiste à définir la loi du modèle à l'aide de paramètres inconnus pour les ajuster ensuite aux données dont on s'est muni. Ceci s'effectue, typiquement, dans un contexte probabiliste et consiste *grosso modo* à soumettre le système à des entrées dont la statistique est connue puis à inférer la valeur la plus probable des paramètres à partir des statistiques observées de la sortie. Dans ce processus, la richesse statistique des entrées n'est pas le moindre des paramètres car celles-ci doivent, pour une bonne identification, exciter

les différentes parties du système. Par ailleurs, la mesure théorique de la qualité d'un algorithme de ce type est l'efficacité statistique avec laquelle on converge vers les "vrais" paramètres du système si on fait l'hypothèse que celui-ci est du type prescrit.

Ceci est en contraste avec certains problèmes d'identification couramment rencontrés en ingénierie, où les données les plus aisées à obtenir (expérimentalement ou par simulation) sont les réponses du système, supposé linéaire et stable, à des excitations périodiques dans sa bande passante de fréquences. Ceci fournit une estimation des valeurs de la fonction de transfert à certaines fréquences, et on souhaite bâtir à l'aide de celles-ci un modèle ayant un comportement reflétant bien celui du système dans la bande passante et doté d'un amortissement suffisant aux autres fréquences. On souhaite que ce modèle soit rationnel et de degré raisonnable, afin de pouvoir l'utiliser efficacement pour le contrôle ou l'estimation, mais son ordre n'est pas toujours prescrit *a priori*. Le type des entrées, enfin, est imposé et aucune statistique n'est disponible sur les erreurs, qui proviennent autant des défauts de mesure que du caractère erroné de l'hypothèse de linéarité. C'est à une étude pragmatique de ce problème, fondée sur la théorie des fonctions, que se consacrent les efforts du projet en identification. La caractéristique principale de notre approche est la dissociation entre une étape d'identification proprement dite, qui fournit un modèle de dimension infinie –numériquement de dimension grande– (sections 3.1.1 et 3.1.9), et une étape d'approximation rationnelle de ce modèle destinée à réduire l'ordre (section 3.1.5). Pour des raisons de commodité nous abordons souvent ces questions non sur l'axe imaginaire mais, ce qui est équivalent, sur le cercle unité où elles correspondent à des considérations analogues pour les systèmes à temps discret.

3.1.1 Approximation de fonctions de transfert dans une bande de fréquence

Participants : Laurent Baratchart, Fabien Seyfert, Juliette Leblond, Jonathan Partington (Univ. Leeds, GB), Nabil Torkhani, José Grimm (projet SAFIR)

L'élaboration de modèles linéaires stables (de dimension infinie) à partir de données fréquentielles, commencée il y a deux ans, a été poursuivie. La prise en compte explicite du caractère local en fréquence, c'est à dire

du fait que les données ne sont disponibles que dans une bande de fréquence imposée Ω , est une des caractéristiques de notre approche. On se dote aussi, à l'extérieur de Ω , d'une fonction représentant un comportement de référence et on se ramène par transformation conforme au cas du cercle unité T , l'intervalle Ω de l'axe imaginaire correspondant alors à un arc de cercle K . Le degré n'étant pas contraint, nous abordons le problème composante à composante si le système a plusieurs entrées ou sorties, c'est à dire que nous nous ramenons au cas scalaire. La notion de stabilité considérée est l'appartenance de la fonction de transfert à l'espace de Hardy H^p . Le choix de p dépend bien sûr du type de modélisation souhaité, et l'accent est mis en pratique sur les cas $p = 2$ et $p = \infty$. On cherche donc une fonction de H^p , prenant sur K des valeurs proches des données expérimentales, et présentant sur $\mathbb{T} \setminus K$ un comportement ne différant pas trop du comportement de référence. Après une première étape d'interpolation des données ponctuelles par un modèle (instable) f sur K , le problème s'énonce comme une généralisation d'un problème extrémal classique :

(P) Soient $p \geq 1$, K un arc du cercle unité T , $f \in L^p(K)$, $h \in L^p(T \setminus K)$ et $M > 0$; on cherche une fonction $g \in H^p$ telle que la norme de la différence $g - h$ dans $L^p(T \setminus K)$ n'excède pas M et telle que $g - f$ soit de norme minimale β_p dans $L^p(K)$.

L'existence pour tout p d'une telle fonction g et son unicité pour $p < \infty$ avaient été obtenues ; pour $p = \infty$, nous avons montré l'équivalence entre (P) et un problème de Nehari classique, ce qui permet de conclure à l'unicité de g lorsque $f \vee h$, la fonction de $L^\infty(T)$ qui vaut f sur K et h sur $T \setminus K$, appartient à $H^\infty + C(\mathbb{T})$. Ces résultats sont rassemblés dans [30] et sont soumis pour publication à *Constructive Approximation*.

Lorsque le système à identifier n'est pas strictement propre, c'est à dire si la valeur de la fonction de transfert n'est pas nulle à l'infini, la fonction h ci-dessus doit, pour une bonne identification, exhiber cette valeur qu'on ne connaît pas. Afin de l'estimer, nous avons donc été amenés à modifier le problème (P) en remarquant que lorsque $p < \infty$ et si la fonction de transfert est dans $H^p + \mathbf{R}$, sa valeur à l'infini serait, compte-tenu de la transformation conforme, l'unique nombre c tel que $f - c/(1 - z)^{2/p}$ soit trace sur K d'une fonction de H^p . A présent, lorsque h est supposée quelconque dans $L^p(K)$, on pose par analogie le problème suivant :
(P1) Soient K un arc du cercle unité T , $f \in L^p(K)$ et $M > 0$; on cherche une fonction $g \in H^p$ et une constante $c \in \mathbb{C}$ telles que la norme de g dans $L^p(T \setminus K)$ n'excède pas M et telle que $g - (f - c/(1 - z)^{2/p})$

soit de norme minimale dans $L^p(K)$.

Nous avons établi l'existence d'une solution (c, g) au problème $(P1)$ ainsi qu'une expression relativement explicite de (c, g) , lorsque $p = 2$, g se présentant alors comme une perturbation de rang 1 de la solution du problème (P) .

3.1.2 Application à l'identification de filtres hyperfréquences

Une convention de recherche, passée avec le CNES (centre de Toulouse) et qui implique aussi le projet SAFIR de l'INRIA-Sophia, portant sur l'identification de cavités hyperfréquences bimodes, nous a permis de tester sur des données industrielles les algorithmes élaborés à partir de la théorie évoquée ci-dessus. Le problème posé par le CNES est l'identification d'un filtre passe bande aux alentours de 11Ghz, dont l'usinage forcément imprécis a dégradé la fonction. Les données sont obtenues dans une bande de fréquence d'une largeur de 80 Mhz à l'aide d'un voluboscope, et on souhaite *in fine* une approximation rationnelle de degré 8. Dans le cadre hilbertien $p = 2$ une procédure de calcul de la solution de (P) avait été implémentée par F. Seyfert et J. Grimm. Pour $p = \infty$, une implémentation a été réalisée par N. Torkhani. Ces programmes ont donné des résultats très satisfaisants sur les premiers jeux de données fournis par le CNES et ont permis d'en faire l'approximation rationnelle composante à composante en degré 8 (c'est à dire dans le cas scalaire cf section 3.1.5).

Une nouvelle convention de recherche avec le CNES a été passée pour identifier ces filtres sous forme de matrices de transfert 2×2 de degré 8. (section 3.1.5). Il faut cependant noter que deux des quatre éléments de la matrice de transfert, correspondant à la réflexion, ne sont pas strictement propres. Lors de la première convention de recherche, nous avons pu estimer la valeur à l'infini et la soustraire aux valeurs ponctuelles fournies mais cette estimation semble plus délicate pour les jeux de données que l'on traite actuellement. Ceci nous amène à implémenter une résolution du problème $(P1)$ dans le cas $p = 2$, mais soulève quelques difficultés numériques dues aux mauvaises propriétés de convergence des développements de Fourier. On étudie présentement la possibilité d'utiliser une base de H^2 différente (base de Szëgo, par exemple).

3.1.3 Application à l'annulation d'écho

Cette application démarre, grâce à une bourse DRET dont bénéficie F. Seyfert, en collaboration avec M. Bordier et J.P. Marmorat (CMA Ecole des Mines de Paris). L'objet en est la faisabilité du contrôle actif de l'écho d'un sous-marin en minimisant l'énergie de l'onde sonore réfléchie. Ce phénomène a été modélisé par le CMA de l'EMP sous forme d'un système dynamique linéaire stationnaire causal et stable de dimension infinie, dont on cherchera dans un premier temps à identifier la matrice de transfert (2×2) dans H^2 et H^∞ , avant d'en étudier l'approximation rationnelle puis le contrôle robuste. On dispose pour ce faire de données fréquentielles obtenues par simulations numériques (ultérieurement, des données expérimentales mesurées en bassin pourraient être fournies par la DRET). Cependant, il est à noter que deux des quatre éléments du transfert correspondants à des mesures d'énergie ne sont évalués qu'en module. Il s'agit donc d'étendre l'approche au cas où la phase est inconnue, ce qui paraît tout à la fois intéressant et difficile.

3.1.4 Application à l'identification robuste

L'implémentation de l'algorithme de résolution du problème (P) dans le cas $p = \infty$ fait l'objet de la thèse de N. Torkhani. Son programme donne de bons résultats, sur le premier jeu de données du CNES. Toutefois, l'opérateur de meilleure approximation de $L^\infty(\mathbb{T})$ dans H^∞ n'est pas continu, ce qui peut provoquer des avatars numériques importants. Par ailleurs, la solution g du problème (P) n'est en général pas continue sur \mathbb{T} . Ceci a motivé la recherche d'une solution constructive f_N au problème suivant. On suppose que les mesures sont de la forme $(a_k) = (f(z_k) + \eta_k)$ pour tout k , $1 \leq k \leq N$, où la suite $\eta = (\eta_k)$ est bornée dans l^∞ et représente un bruit déterministe.

(P2) Soient K un arc du cercle unité T , $f \in H^\infty \cap C(K)$, $h, r \in C(T \setminus K)$, r positive. On cherche $f_N \in H^\infty \cap C(T)$ approximant robustement f sur K :

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \epsilon \rightarrow 0}} \sup_{\|\eta\|_\infty \leq \epsilon} \|f_N - f\|_{L^\infty(K)} = 0,$$

et qui, sur $\mathbb{T} \setminus K$, satisfasse la contrainte de gabarit :

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \epsilon \rightarrow 0}} \sup_{\|\eta\|_\infty \leq \epsilon} |f_N(z) - h(z)| \leq r(z) \quad \forall z \in \mathbb{T} \setminus K.$$

Nous avons prouvé que si (z_k) est dense dans K , si $f \vee h \in C(\mathbb{T})$, si f elle-même satisfait la contrainte de gabarit et si r est ρ -Lipschitz sur $\mathbb{T} \setminus K$, $0 < \rho < 1$, et nulle aux extrémités de K , alors il existe une suite d'applications $T_N : \mathbb{C}^N \rightarrow H^\infty \cap C(\mathbb{T})$ telle que $f_N = T_N(a_1, \dots, a_N)$ soit solution de (P2) pour toute fonction $f \in H^\infty \cap C(\mathbb{T})$ telle que $|f(z) - h(z)| \leq r(z)$ pour tout $z \in \mathbb{T} \setminus K$.

Il s'agit-là d'un résultat de convergence robuste sur K qui généralise au cas de données incomplètes les résultats obtenus par J. Partington pour des données uniformément réparties sur \mathbb{T} . Notons que la preuve de l'existence de T_N nécessite une extension de (P) pour $p = \infty$ au cas d'une contrainte variable en module sur $\mathbb{T} \setminus K$ de la forme $|g - h| \leq r$. De plus, la construction de T_N repose sur la résolution d'un problème de Nehari. L'étude de certaines propriétés de monotonie nécessaires au bon fonctionnement de cet algorithme et l'implémentation effective de ce dernier font aussi partie de la thèse de N. Torkhani. Ce travail fait l'objet d'une communication [10].

Les résultats précédents conduisent naturellement à s'interroger sur le choix de h , qui consiste *grosso modo* à deviner ce que peut être la fonction de transfert à l'extérieur de la bande de fréquence dans laquelle on la mesure. Une question intéressante à ce sujet, quelque peu duale du problème (P), est la suivante : (P3) Soient $p \geq 1$, K un arc du cercle unité T , $f \in L^p(K)$, et $M > 0$; on cherche une fonction $h \in L^p(\mathbb{T} \setminus K)$ dont la norme n'excède pas M et telle que la distance de $f \vee h$ à H^p soit minimale dans $L^p(\mathbb{T})$.

Nous avons théoriquement résolu le problème (P3) dans le cas $p = 2$, et avons obtenu une expression de la solution h . Comme dans le cas de (P), cette dernière fait intervenir l'inverse d'un opérateur de Toeplitz. Ceci fait partiellement l'objet de la thèse de N. Torkhani, qui a implémenté une procédure de calcul de h , et a fait l'objet d'une soumission à la conférence ECC 95. Le cas $p = \infty$ est actuellement ouvert.

3.1.5 Approximation rationnelle de fonctions de transfert

Participants : Laurent Baratchart, Pascale Fulcheri, Martine Olivi, Franck Wielonsky

Le but est ici de construire une approximation de dimension finie du modèle de dimension infinie, c'est à dire numériquement de dimension grande, dont l'obtention a été discutée précédemment. On cherche donc

une matrice rationnelle qui soit proche, en un sens convenable, d'une matrice de transfert stable \mathcal{F} dont les éléments ont été retenus pour leur capacité à approximer les données mais sans se soucier de la contrainte de rationalité. Les transferts rationnels étant denses dans les espaces fonctionnels usuellement considérés (et il doit en être ainsi si l'on veut obtenir une bonne approximation rationnelle), il est nécessaire de contraindre le problème d'approximation pour qu'il soit bien posé. Nous choisissons ici de borner l'ordre du modèle, qui est en général le paramètre le plus significatif. Dans ce contexte, il est souvent important de disposer de l'assurance que les approximants obtenus sont optimaux ou sous-optimaux en un certain sens, parce que l'on veut tirer le meilleur parti de l'ordre alloué au modèle. Ceci est le cas, par exemple, dans le cadre de la convention de recherche qui lie le projet au CNES, car ce dernier souhaite estimer certains paramètres physiques mis en jeu dans des filtres hyperfréquences, lesquels ne s'interprètent que sur un modèle d'ordre 8 en l'occurrence.

L'approximation rationnelle dans le domaine complexe est un sujet classique et ardu. En relation avec l'Automatique, deux éléments de difficulté supplémentaires s'y greffent, à savoir la nécessité de contrôler les pôles des approximants (pour la stabilité) et celle de traiter le cas matriciel dans la plupart des cas. Ceci induit une dichotomie dans notre abord des problèmes, qui est de mettre au point en priorité des théories et des algorithmes dans le cas scalaire avant de tenter de les généraliser au cas multivariable, et explique en partie notre investissement sur le problème de l'approximation rationnelle dans H^2 qui fournit naturellement des approximants stables.

3.1.6 Approximation rationnelle scalaire

Compagnon naturel des techniques d'identification précédentes, l'approximation rationnelle dans H^p s'énonce ainsi:

Soient $1 \leq p \leq \infty$, $\mathcal{F} \in H^p$ et n un entier ; on cherche une matrice rationnelle sans pôles dans le disque unité et de degré de Mc-Millan au plus n qui soit le plus proche possible de \mathcal{F} dans H^p .

Les valeurs $p = 2$ et $p = \infty$ sont d'un intérêt particulier en Automatique : la première parce qu'elle correspond à une identification paramétrique au minimum de variance lorsque l'entrée est un bruit blanc (dans le cas d'un bruit coloré il faut pondérer le critère par sa densité spectrale) et

la seconde parce qu'elle correspond à la minimisation de l'erreur au plan de la transmission d'énergie.

Depuis des années, le projet étudie le cas $p = 2$ en se concentrant sur certains points de grande importance algorithmique comme la nature et le nombre des points critiques. En conjugant des techniques de théorie de Morse avec des estimations analytiques, nous avons notamment fourni un théorème d'unicité (le premier du genre) pour des fonctions de Stieltjes (correspondant à des systèmes de relaxation). Cette année, une avancée importante a été réalisée qui relie le type asymptotique des points critiques à la régularité de la décroissance des erreurs en interpolation, elle même reliée à la coprimarité des numérateurs et dénominateurs de ces points. Un travail en commun avec le professeur E. B. Saff (Univ. de Floride du sud) est en cours de rédaction, qui illustre cette technique en prouvant l'unicité asymptotique sur trois exemples. Le premier est celui de la fonction exponentielle, qui utilise des estimées fines obtenues l'an dernier sur l'erreur d'interpolation pour cette fonction (l'utilisation de ces interpolants en intégration numérique a été l'objet d'un stage de maîtrise co-encadré avec A. Désideri du projet SINUS)¹; Le second est un théorème du type Montessus de Ballore dans le cas H^2 , qui concerne l'approximation de type (m, n) de fonctions méromorphes dans une couronne lorsque m devient grand et permet de retrouver, en principe, les pôles de la fonctions; le troisième concerne le cas de l'approximation H^2 sur un disque petit de fonctions dont l'approximant de Padé n'est pas dégénéré. Ces théorèmes sont originaux par leur contenu et leur technique de preuve, et laissent entrevoir des généralisations intéressantes.

Au plan numérique, une version plus efficace de l'algorithme mis au point dans le cas scalaire réel a été implémentée, et généralisée au cas complexe. Ce travail est effectué en collaboration avec J. Grimm, du projet SAFIR à l'INRIA-Sophia, dans le cadre de la convention avec le CNES mentionnée précédemment. Les résultats obtenus jusqu'à présent sur les données correspondantes sont satisfaisants.

Par ailleurs, la venue au sein du projet de M.P. Istace comme boursier HCM a engendré un début d'activité en approximation rationnelle H^∞ , dont les approches classiques sont basées sur les équations variationnelles de Kolmogorov et pour laquelle on étudie les parallèles existant avec la théorie différentielle H^2 décrite plus haut.

¹*Rational Interpolation to the exponential function*, L. Baratchart, E. B. Saff, F. Wielonsky, to appear in Canadian J. of Math

3.1.7 Approximation rationnelle matricielle

Une extension au cas multivariable de l'algorithme d'approximation H^2 mentionné ci-dessus a été menée à l'état de prototype. Elle a fait l'objet de la thèse de P. Fulcheri [1]. Cette extension, rappelons-le, est fondée sur l'utilisation des paramètres de Schur (tangentiels) et de la factorisation de Douglas-Shapiro-Shields pour représenter les matrices de degré de Mc-Millan donné. Grâce à une formulation originale de l'algorithme de Schur tangentiel, nous avons pu élucider les questions théoriques que soulevait cette extension. Une maquette a été implémentée à l'aide du logiciel Ψ lab, système de CAO dédié à l'automatique, conçu et réalisé par l'INRIA (UR Rocquencourt) à partir du logiciel BASILE. Ce logiciel a été choisi pour ses fonctionnalités qui allient une utilisation facilitée par le langage des macros à la possibilité d'utiliser les bibliothèques numériques Fortran. Il fonctionne actuellement sur des données matricielles 2×2 provenant d'expérimentations du CNES, dans le cadre du contrat précédemment cité, et donne à l'ordre 8 des résultats prometteurs. Il devrait servir de base à un nouveau logiciel directement écrit en C avec de meilleures performances numériques. Cette étude doit faire l'objet d'un article en préparation.

3.1.8 Approximation pondérée de fonctions de transfert scalaires

Participants : Juliette Leblond, Martine Olivi, Arnaud Fahri

On introduit ici une pondération dans les problèmes d'approximation L^2 décrits en sections 3.1.1 et 3.1.5. Plus précisément, il s'agit de généraliser les étapes qui conduisent depuis les données fréquentielles expérimentales jusqu'à une approximation rationnelle d'ordre fixé au cas où les critères à minimiser s'expriment en norme $L^2(d\mu)$ où μ est une mesure positive finie sur le cercle.

Dans un premier temps, nous avons mis en évidence une classe de mesures susceptibles de donner lieu à une telle généralisation. Il s'agit de mesures absolument continues par rapport à la mesure de Lebesgue et dont la dérivée par rapport à cette dernière est inversible dans H^∞ . Par la suite, nous avons généralisé les résultats concernant l'approximation de fonctions de transfert dans une bande de fréquences ; l'analogue du problème (P) lorsque $p = 2$ et que la norme est celle induite par $L^2(d\mu)$ admet une unique solution g_μ que nous construisons

assez explicitement. L'approximation rationnelle au sens $L^2(d\mu)$, soulève quant-à-elle d'importants problèmes théoriques. Ceci a été le sujet du stage de A. Fahri [35] et a donné lieu à soumission d'une communication pour une conférence. Ce sujet ouvre de nombreuses perspectives théoriques et pratiques, car la pondération est un paramètre très influent en approximation.

3.1.9 Caractérisation des traces des espaces de Hardy sur un arc de cercle

Participants: Daniel Alpay (université de Beer-Sheva, Isr.), Juliette Leblond

Nous avons obtenu une caractérisation des traces sur un arc K du cercle unité des fonctions appartenant à l'espace de Hardy H^2 vérifiant une contrainte de bornitude en norme $L^2(\mathbb{T})$, question issue du problème extrémal (P) décrit en section 3.1.1, lorsque $p = 2$. Cette caractérisation se présente sous la forme d'une condition nécessaire et suffisante de positivité d'une certaine fonctionnelle. Ce résultat a été généralisé au cas matriciel, toujours par le biais de la théorie des espaces de Hilbert à noyaux reproduisants, et fait l'objet d'un article soumis pour publication.

3.2 Structure et commande des systèmes non-linéaires

Cette activité comprend deux aspects : stabilisation des systèmes non-linéaires par retour d'état ou de sortie, et transformations (dynamiques) des systèmes non-linéaires.

3.2.1 Etude qualitative de la stabilisation périodique de systèmes mécaniques non-holonomes

Participants: Zhong-Ping Jiang, Pascal Morin (Projet ICARE), Jean-Baptiste Pomet, Claude Samson (Projet ICARE)

Il s'agit de rendre effectifs les travaux récents sur la stabilisation par retour d'état périodique de systèmes non-linéaires qui ne peuvent être stabilisés par retour d'état stationnaire.

Les systèmes considérés sont ici des systèmes mécaniques, et c'est tout naturellement que cela donne lieu à une collaboration avec le projet ICARE.

Les travaux entrepris concernent notamment des systèmes non-holonomes intervenant en robotique mobile. Pour de tels systèmes, des lois stabilisantes sont connues depuis quelques années. On étudie ici les transitoires et la vitesse de convergence vers le point d'équilibre ; ce point est crucial car il n'est pas possible, dans notre cas, d'obtenir une convergence exponentielle à partir de commandes différentiables, si bien qu'il faut soit se diriger vers des commandes moins régulières soit étudier très finement les vitesses de convergence "lentes". La possibilité de synthétiser des lois de commande homogènes de degré inférieur à un (et donc non différentiables, mais continues) qui conduisent à une stabilisation exponentielle est présentée dans la publication [24].

Un autre volet de ces travaux concerne la stabilisation de l'attitude d'un corps solide en rotation autour de son centre de gravité, et non complètement commandé (un satellite artificiel en mode dégradé par exemple). Pour de tels systèmes, seul un résultat d'existence de loi stabilisante était disponible. La recherche et l'étude de lois stabilisantes explicites est le sujet de la thèse de Pascal Morin, et fut aussi l'un des sujets de travail de Zhong-Ping Jiang pendant son séjour post-doctoral. Une méthode explicite de construction de telles lois de commande a été obtenue², et fait l'objet d'une communication au CDC [21]. La suite du travail doctoral de Pascal Morin consiste à étudier le comportement qualitatif des transitoires, et la robustesse de cette stabilisation à des erreurs de modélisation. La première partie de son travail de thèse a été financée par la D.R.E.T.

Notons enfin un travail plus ponctuel [17] concernant la stabilisation de systèmes non-holonomes avec des paramètres inconnus.

3.2.2 Transformations dynamiques des systèmes non-linéaires

Participants : Jean-Baptiste Pomet, Joachim Rudolf

²*Time-varying feedback stabilization of the attitude of a rigid spacecraft*, P. Morin, C. Samson, J.B. Pomet, Z.P. Jiang, *to appear in Systems & Control Letters*

Une transformation par *retour d'état dynamique* d'un système dynamique contrôlé consiste à effectuer une extension dynamique (augmentation de l'état et attribution d'une dynamique aux nouveaux états) suivi d'une transformation par retour d'état statique sur le système augmenté. L'intérêt d'une telle transformation, dans le cas où le système obtenu possède une structure plus exploitable que l'original, est qu'une commande permettant de satisfaire un certain objectif sur le système transformé peut être utilisée pour commander le système original en incluant l'extension dynamique dans le contrôleur. Evidemment, un cas favorable est celui où le système transformé est linéaire. Le problème de la linéarisation dynamique est celui de trouver des conditions explicites sur un système pour qu'existe une telle transformation dynamique.

Des travaux récents (M. Fliess, J. Lévine, P. Martin, P. Rouchon) ont montré qu'un tel feedback dynamique existe si et seulement si il existe un certain nombre de fonctions de l'état initial et de dérivées de la commande qui ne sont liées par aucune équation différentielle, et qui "paramètrent toutes les trajectoires". Cette propriété est appelée "platitude différentielle", et les fonctions en question (ou sorties) linéarisantes, ou plates. Ceci donne un intérêt nouveau au problème car ces fonctions permettent de simplifier certains problèmes comme celui de la planification de trajectoire. C'est aussi une manière plus systématique de s'attaquer au problème de la linéarisation dynamique (rechercher des fonctions linéarisantes).

Une collaboration avec le Laboratoire d'Automatique de Nantes³ avait permis de mettre en évidence l'existence de formes différentielles, non forcément intégrables, qui vérifient exactement la propriété que l'on attend de sorties linéarisantes (hormis qu'elles ne peuvent fournir de fonctions !) et de formuler la recherche de sorties linéarisantes comme celle de transformations sur les familles de formes différentielles qui préservent ces propriétés et en plus les rendent intégrables. De plus, un cadre de géométrie différentielle (de dimension infinie) a été développé pour ces problèmes; [39] le présente en détail, et [29] présente les résultats précédents dans ce cadre. Cette approche a permis de résoudre le

³A *linear algebraic framework for dynamic feedback linearization*, E. Aranda-Bricaire, C. Moog., J.B. Pomet, to appear in *IEEE Trans. on Automatic Control*, Janvier 1995

problème de la linéarisation dynamique avec certaines restrictions pour des systèmes de petite dimension⁴.

3.3 Modélisation et contrôle en biologie et environnement

Participants : Hervé Elmoznino, Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry, Jean-Baptiste Pomet, Suzanne Touzeau

Nos recherches sont structurées autour de trois applications concernant la gestion des ressources renouvelables, du laboratoire (le chémostat) à l'échelle industrielle (la pêche). Elles s'intègrent dans le G.D.R. CNRS (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, est dirigé par C. Lobry (Univ. de Nice et Station Zoologique de Villefranche) et animé par notre équipe. Ces recherches font l'objet d'une collaboration avec le projet Congé, dirigé par G. Sallet, à Metz, avec le C.M.A. de l'Ecole des Mines (M. Bordier), la Station Zoologique de Villefranche-sur-Mer (P. Nival, A. Sciandra), l'Université de Nice-Sophia-Antipolis (A. Chérif et R. Lozi) et l'IFREMER de Nantes (Lab. MAERHA).

3.3.1 Modélisation de la croissance du plancton en laboratoire

Participants : Olivier Bernard (CNRS Villefranche), Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry

Nous travaillons en collaboration avec la Station Zoologique de Villefranche sur mer (URA 716), qui a mis au point un chémostat (petit bioréacteur) automatisé et géré par ordinateur ; ce système se prête donc particulièrement 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 commande toute la production de la matière organique des océans ; cependant, les modèles classiques existants (Monod, Droop) révèlent leur insuffisance en

⁴On *Dynamic Feedback linearization of Control affine systems in \mathbb{R}^4 with two inputs*, J.-B. Pomet, *soumis aux Annales de l'IHP*

environnement “trop” variable.

Nous avons poursuivi (en collaboration avec O. Bernard de Villefranche) le développement d'une méthode de validation 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. On étudie alors la succession temporelle des extrema de chaque variable : on obtient un graphe de transition qui résume les scénarii possibles, et on compare avec les résultats expérimentaux. Il est clair que l'observation d'un maximum ou minimum temporel sur des données est un renseignement qualitatif assez facile à obtenir, même quand il y a beaucoup de bruit.

Nous avons appliqué cette méthode de validation au modèle classique de Droop, à une chaîne nutriment-proie-prédateur, et à un système de deux espèces bactériennes en compétition⁵.

Nous avons développé une extension de la méthode, qui permet d'examiner aussi la succession temporelle du signe de l'écart par rapport à un équilibre quelconque. C'est généralement un renseignement facile à obtenir sur les données.

3.3.2 Dynamique et contrôle de la pêche et de l'aquaculture

Participants : Jean-Luc Gouzé, Jean-Baptiste Pomet, Suzanne Touzeau

Nous continuons l'étude et le contrôle de modèles de pêche, en raffinant maintenant les modèles utilisés. Les recherches se font en liaison avec le laboratoire MAERHA de l'IFREMER Nantes.

Nous étudions les populations marines exploitées à partir de modèles en temps continu, structurés en âges. Sur l'effectif de chaque classe d'âge s'exercent la mortalité naturelle, le passage de la classe inférieure et dans la classe supérieure, ainsi que la pêche.

Nos travaux ont porté plus particulièrement sur les relations stock-recrutement qui permettent de boucler de tels modèles. En effet, ces relations relient le nombre de juvéniles entrant dans la phase exploitable, appelé “recrutement”, au stock fécond.

⁵*Transient behavior of biological loop models, with application to the Droop model*, O. Bernard and J.L. Gouzé, to appear in *Mathematical Biosciences*

Souvent dans la littérature, au lieu de considérer une telle relation, le recrutement est pris comme une constante, ou encore un bruit blanc de moyenne non-nulle, car les formes classiques de stock-recrutement ne sont pas satisfaisantes vis à vis des données expérimentales. Les relations reliant les matures à leur progéniture sont non-linéaires, à cause de phénomènes tels la densito-dépendance de la mortalité naturelle des juvéniles (due au partage des ressources par exemple), le cannibalisme parental. . .

La modélisation de la phase pré-recrutée, prenant en compte ces phénomènes, a permis de mettre en évidence les hypothèses très fortes sous-tendues par ces formes classiques. En outre, elle a montré de manière générale, que la relation stock-recrutement n'était pas une fonction.

Parallèlement, nous nous sommes penchés sur la stabilité d'un tel système, sans modéliser la phase pré-recrutée, mais en recherchant des conditions très générales sur le recrutement, garantissant l'absolue stabilité du système.

En collaboration avec l'IFREMER, et avec R. Fournier du Semir, une première maquette d'un logiciel interactif de simulation de populations marines spatialisées a été réalisée ; l'utilisateur peut définir les périodes de migration de chaque espèce ainsi que la dynamique du système.

3.3.3 Dynamique de la forêt

Participants : Claude Lobry, Hervé Elmoznino

Depuis sa participation à Kourou en juillet 1993 à un séminaire sur la modélisation d'une forêt dense humide (particulièrement la forêt amazonienne) C. Lobry a entrepris une étude exploratoire des difficultés de la modélisation d'un tel milieu. Les points suivants ont été mis en évidence.

- Une simulation réaliste fait intervenir 10^5 à 10^6 arbres situés spatialement, interagissant entre eux dans un environnement variable : il s'agit, a priori d'une simulation lourde.
- Les utilisateurs de ces simulations (naturalistes, forestiers, écologues) n'ont, généralement, pas de formation à la modélisation ce qui impose la réalisation de couches de convivialité performantes.
- Le problème de la modélisation est lié à celui de l'acquisition des données par satellite, avion ou hélicoptère.

H. Elmoznino a réalisé des démonstrations vidéo des possibilités de la connection machine. Le logiciel réalisé sera exploité pour présenter des exemples “académiques”. De plus, Lobry a contribué a la mise au point d'un logiciel (de démonstration) de l'INRA en cours de développement à Kourou.

3.3.4 Mathématiques de la modélisation

Participants : Jean-Luc Gouzé, Claude Lobry

Nous avons poursuivi nos recherches sur les systèmes différentiels non-linéaires issus de la biologie, ayant en particulier la propriété de laisser invariant l'orthant positif (car les variables biologiques sont positives : nombre, concentration...). Nous étudions particulièrement les systèmes de Lotka-Volterra, qui sont des modèles classiques d'interaction entre n espèces. A partir de la dimension trois, ils présentent un comportement compliqué (cycles, chaos...). Nous avons alors développé plusieurs approches utilisant des changements de variables et une technique de champs coopératifs (la matrice jacobienne est positive en dehors de la diagonale). Nous utilisons également des graphes décrivant les passages possibles entre certaines régions de l'espace des variables.

Nous avons appliqué sur un exemple un des critères de convergence globale vers l'équilibre que nous avons obtenus. Le contrôle porte sur les taux de mortalité ou de reproduction des populations, et il est positif (on peut imaginer que c'est l'influence de l'environnement, la pollution...); on obtient une loi $u(x)$ explicite qui conserve u positif et stabilise globalement le système vers une consigne donnée.

C. Lobry en collaboration avec A. Sciandra et P. Nival a mis en évidence sur un “modèle de pensée” des effets paradoxaux sur la croissance ou la compétition des espèces, induits par les fluctuations de l'environnement. Ce travail a été exposé dans un colloque d'halieumétrie et a fait l'objet d'une lecture publique de note à l'Académie des Sciences.

Un petit système interactif permettant un lissage très convivial de données expérimentales a aussi été écrit (en collaboration avec R. Fournier du Semir).

3.4 Jeux différentiels et commande H^∞ optimale

Participants : Pierre Bernhard, Stéphane Le Méneç (projet SECOIA), Odile Pourtallier, Arik Melikian (Académie des Sciences de Russie), Alain Rapaport, Mabel Tidball

3.4.1 Jeux de poursuite avec information discrète

Participants : Odile Pourtallier, Arik Melikian

Une nouvelle extension des jeux de poursuite évacion avec information en temps discret a été envisagée. Elle concerne les jeux avec plusieurs poursuivants. Le cas de tels jeux en information continue est un sujet de recherche relativement classique en Russie. On étudie ici la situation où les poursuivants choisissent les instants auxquels ils ont accès à l'information. Ce travail est effectué en collaboration avec Arik Melikian de l'Institut des problèmes mécaniques de l'Académie des Sciences de Russie à Moscou.

3.4.2 Commande MiniMax en information imparfaite

Participants : Alain Rapaport, Pierre Bernhard

La théorie de la commande minimax en information imparfaite commencée l'année précédente^{6 7} a pu être étendue aux problèmes à temps final variable, en traitant en fait l'instant final comme une décision du maximiseur (ce qui remplace l'équation d'Hamilton Jacobi Isaacs par une inéquation variationnelle). Ces questions et un travail antérieur sur un jeu de poursuite-évasion suggéré par la DCAN, ont donné lieu à la soutenance d'une thèse de doctorat par Alain Rapaport [3].

On a aussi mis en évidence un parallélisme surprenant entre notre théorie de la commande minimax et la commande stochastique classique, parallélisme qui est révélé par le concept de "mesure de coût" introduit par Quadrat et ses collaborateurs (projet META 2), et plus généralement par leur théorie de la dualité entre l'algèbre classique $(+, \times)$ et l'algèbre $(\max, +)$. Ceci a donné lieu à deux communications internationales.

⁶ *On a theorem of Danskin with an application to a theorem of Von Neumann-Sion*, P. Bernhard and A. Rapaport, to appear in *Non linear Analysis and Applications*

⁷ *A discrete time min-max certainty equivalence principle*, P. Bernhard, to appear in *Systems and Control letters*

3.4.3 Jeux dynamiques et programmation Avancée

Participants : Stéphane Le Méneç (projet SECOIA), Pierre Bernhard

Ce travail poursuivi depuis plusieurs années sur l'utilisation conjointe de l'intelligence artificielle et des jeux dynamiques a donné lieu à la thèse de Stéphane Le Méneç [2], qui a par ailleurs été recruté (avant sa soutenance) par MATRA-Défense. Rappelons que le problème modèle examiné est celui de l'aide à l'utilisation de missiles air-air du type MICA/AMRAAM dans un combat aérien. Cette recherche, entièrement fondée sur des données disponibles dans la presse spécialisée, avait été suivie de près par MATRA-Défense.

3.4.4 Calcul numérique de la fonction valeur d'un jeu différentiel en information parfaite

Participants : Odile Pourtallier, Mabel Tidball

La fonction valeur d'un jeu ou d'un problème de contrôle optimal est une "e-solution" (enveloppe des solutions de viscosité) d'une équation aux dérivées partielles, l'équation d'Isaacs ou de Hamilton-Jacobi-Bellman. On a poursuivi l'étude comparative des différentes méthodes d'approximation numérique de cette solution.

3.4.5 Approximations des jeux stochastiques

Participants : Eitan Altman, Odile Pourtallier, Mabel Tidball

Nous développons dans un article à paraître ⁸ et dans [40] des théorèmes généraux pour l'approximation des jeux à somme nulle. Nous étudions la convergence des valeurs des jeux et des politiques (presque) optimales, puis la robustesse des politiques optimales. Nous appliquons les théorèmes généraux pour développer des schémas numériques d'approximation des jeux stochastiques à espace d'état infini par des jeux stochastiques à espace d'état fini. Les théorèmes généraux permettent aussi la démarche inverse: obtenir des politiques presque optimales pour des jeux stochastiques ayant un espace d'état fini mais grand, à partir des politiques optimales pour le jeu à espace d'état infini, qui est parfois plus simple à résoudre (c.f. des problèmes des jeux dans les

⁸*Approximations in dynamic zero-sum games, I*, M. Tidball and E. Altman, to appear in *SIAM J. Control and Optimization*

files d'attentes). Nous considérons dans l'article à paraître le coût actualisé, et dans [40], le coût moyen. Nous étudions d'autres problèmes d'approximations de stratégies dans [40].

3.5 Divers

3.5.1 Synthèse de contrôleurs optimaux et sous-optimaux

Participants : Juliette Leblond, Michel Gevers, Franky De Bruyne (Université de Louvain, Belg.)

L'on cherche ici à identifier un système linéaire stationnaire scalaire dans le but d'en bâtir un contrôleur. Lorsque l'on suppose que le système appartient à la classe des modèles paramétrés considérée, et pour un critère donné de synthèse du contrôleur, les performances du schéma d'identification choisi peuvent être mesurées par la variance de l'erreur entre la sortie du système en boucle fermée avec le contrôleur optimal et la sortie du système en boucle fermée avec le contrôleur construit depuis le modèle identifié. Pour différents critères de contrôle, il a été établi que de meilleures performances étaient obtenues lorsque la boucle était fermée durant le processus d'identification du système. Ceci a donné lieu à une communication [16] et à la soumission d'un article pour publication.

Par ailleurs, une procédure de calcul simple d'un contrôleur stabilisant LQG-optimal à deux degrés de liberté pour un système linéaire stationnaire scalaire de dimension finie a été proposée par M. Gevers au moyen de la paramétrisation de Youla. Nous avons tenté de généraliser ce résultat au cas où l'on souhaite que le système en boucle fermée soit non seulement stable mais ait ses pôles dans une région prescrite de stabilité (strict sous-ensemble du demi-plan complexe gauche dans le cas continu, du disque unité dans le cas discret). Nous avons établi qu'il n'existait pas en général de contrôleur LQG-optimal dans cette classe, mais qu'en revanche on pouvait bâtir un contrôleur sous-optimal. Un article à ce sujet a été soumis pour publication. La construction d'un contrôleur sous-optimal reste à l'étude et pose des problèmes fins d'approximation rationnelle dans H^∞ .

3.5.2 Planification de trajectoires

Participants : Jean-Daniel Boissonnat (projet PRISME), André Cérézo (Univ. Nice), Juliette Leblond

L'étude des plus courts chemins dans le plan a été poursuivie. Les résultats obtenus précédemment dans le cas d'une contrainte sur la courbure ont donné lieu à la publication de [5]. Nous considérons maintenant une contrainte de bornitude sur la dérivée de la courbure (borne sur la vitesse de rotation du volant dans le cas d'une voiture). Les trajectoires sont alors de classe C^2 et les extrémales sont formées de segments de droite et d'arcs de clothoïde (spirale de Cornu). Il semble cependant que la commande ainsi que la trajectoire optimales soient ici très irrégulières. Il avait été établi qu'une trajectoire extrémale contenant une ligne droite mais n'étant pas réduite à cette dernière contenait nécessairement un nombre infini d'arcs de clothoïde [31]. Un résultat de même type pour toute trajectoire optimale est à l'étude, ainsi que le comportement des points de commutation.

3.5.3 Modélisation d'entreprises

Participants : Laurent Baratchart, Juliette Leblond, Jean-Baptiste Pomet, Philippe Dulbecco (LATAPSES), Jean-Luc Gaffard (LATAPSES), Philippe Laurent

Nous avons élaboré et implémenté numériquement un modèle dynamique de comportement d'entreprise, et plus précisément de l'évolution de la capacité productive de cette dernière. Ce travail s'est fait en relation avec des économistes du L.A.T.A.P.S.E.S. (UMR CNRS 42) dans le cadre du contrat mentionné au §4.

Un modèle discret, non-linéaire, d'ordre élevé avait été obtenu sur la base duquel nous avons pu synthétiser des contrôleurs (c'est-à-dire des stratégies pour les décideurs de l'entreprise) permettant de réaliser certains objectifs qualitatifs. La simulation numérique de ce modèle a fait l'objet du stage de fin d'études de P. Laurent [37].

Ceci a permis d'appréhender les conditions de viabilité d'une entreprise soumise à certains changements structurels de son environnement, question déterminante en économie et stratégie d'entreprise. Ce sujet constitue une application originale de la théorie des systèmes et de

la commande, en même temps qu'une occasion de collaborer avec des chercheurs d'un tout autre domaine, ayant leurs préoccupations propres.

4 Actions Industrielles

Modélisation d'agents économiques

Participants : Laurent Baratchart, Juliette Leblond, Jean-Baptiste Pomet

Contrat de recherche avec le LATAPSES (CNRS, UMR n° 42) et ISIDE (Université de Rome "La Sapienza") sur le développement et la simulation d'un modèle dynamique de comportement de l'entreprise.

Identification

Participants : Laurent Baratchart, Pascale Fulcheri, José Grimm (projet SAFIR), Juliette Leblond, Martine Olivi, Nabil Torkhani, Franck Wielonsky

Contrat 962/94/CNES/1222/00 portant sur l'identification de cavités bimodes pour des filtres hyperfréquence, voir section 3.1.2

Jeux différentiels

Participants : Pierre Bernhard, Bertrand Neveu (projet SECOIA)

Contrat de conseil n° 194E297 auprès de MATRA-Défense.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions internationales

Laurent Baratchart est responsable pour l'INRIA de l'action "Identification" au sein du réseau européen SCIENCE en collaboration avec le CWI (Hollande), l'université de Louvain (Belgique), l'université de Linköping (Suède), le TU-Wien (Autriche), l'IRISA, l'université de Padoue (Italie) et l'université de Cambridge (Grande-Bretagne).

Le projet MIAOU est de plus lié à l'action "Identification" du réseau SCIENCE par le contrat "System Identification" n° PL910302 de la

commission des communautés européennes. Ce contrat qui, outre le projet MIAOU concerne à Sophia le projet MEFISTO, assigne pour co-contractants les organismes mentionnés ci-dessus.

Jean-Baptiste Pomet est éditeur associé de la revue *IEEE Transactions on Automatic Control*. Il participe aussi aux comités de programme de la 3^{ème} Conférence Européenne de Contrôle (*ECC 95*) qui aura lieu en septembre 1995 à Rome et du 33^{ème} *IEEE Conference on Decision and Control* qui aura lieu en décembre 1994 à Orlando.

S. Touzeau a pris part à un groupe de travail européen, portant sur *la modélisation de stratégies de gestion de pêcheries*. La première réunion de travail s'est tenue à Dublin en février 1994, grâce à un financement du programme AIR de la Communauté Européenne. Ce financement devrait être renouvelé.

J.L. Gouzé et S. Touzeau ont participé à la 1^{ère} réunion de DYNPOP, du 10 au 14 septembre 1994 à Tunis. Ce groupe de travail porte sur la dynamique des populations et dépend du *Comité des Vertébrés Marins et Céphalopodes* de la CIESM (Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée).

Un projet de coopération Franco-Russe, dans le cadre de l'institut Lyapounov à l'université de Moscou à été mis en place. Le programme de travail porte sur différents aspects de la théorie des jeux, et notamment sur les méthodes de résolution numérique et sur les jeux en information incomplète. Ce projet a été proposé en collaboration avec le CEREMADE de l'université Paris-Dauphine. Odile Pourtallier effectue un premier séjour à Moscou dans le but de travailler avec Arik Melikian de l'institut de mécanique, ainsi que de prendre contact avec les différents groupes travaillant sur la théorie des jeux.

L'INRIA participe à un projet INTAS de coopération avec la Russie.

5.2 Actions nationales

Programme Environnement du C.N.R.S. (Comité Méthodes, Modèles et Théorie). Jean-Luc Gouzé est coordinateur du groupe de travail "Modélisation et contrôle des ressources renouvelables".

Le G.D.R. CNRS (Programme Environnement, Vie et Sociétés) "Outils et modèles de l'automatique dans l'étude de la dynamique des écosys-

tèmes et du contrôle des ressources renouvelables ”, qui a été créé en 1994, est dirigé par C. Lobry et animé par notre équipe.

5.2.1 Organisation de séminaires

Jean-Luc Gouzé et Claude Lobry organisent un séminaire régulier “Etude et contrôle de modèles écologiques”, en collaboration avec la Station Zoologique de Villefranche-sur-Mer.

Jean-Baptiste Pomet organise un séminaire “Commande et Identification” dont l’assistance regroupe des chercheurs sur ce thème à l’INRIA, au CMA (Ecole des Mines de Paris), et à l’IS (CNRS).

5.2.2 Invitations

En plus des séjours de longue durée signalés à la rubrique “Chercheurs invités” dans la composition de l’équipe, nous avons reçu, pour des durées de 2 jours à une semaine, les scientifiques suivants :

Manfred Deistler (T. U. Wien, Autriche).
 Jonathan Partington (Univ. Leeds, Grande-Bretagne).
 Vlastimil Krivan (Académie des Sciences Tchèque),
 Pavol Brunovsky (Université de Bratislava),
 Marc Tchamitchian (I.N.R.A. Avignon),
 Michel Fliess (Laboratoire des Signaux et Systemes, C.N.R.S., Gif-surYvette),
 Yuan Wang (Florida Atlantic University),
 Jean-Paul Gauthier (I.N.S.A. Rouen et Institut Universitaire de France),
 Cheng-Zhong Xu (INRIA Lorraine, projet CONGE),
 Daniel Alpay (Université de Beer-Sheva, Israel),
 Lionel Rosier (CMLA, Ecole Normale Supérieure de Cachan),
 Jean-Michel Coron (CMLA, E.N.S. Cachan)

6 Diffusion des résultats

6.1 Actions d’enseignement

P. Bernhard est maître de conférences d’exercice partiel à l’Ecole Polytechnique en mathématiques appliquées et a enseigné un cours de commande robuste à l’ISIA ainsi qu’à l’ESSI.

P. Fulcheri a assuré une partie des T.D. de Théorie des Langages en ESSI 1, une partie du cours d'Introduction à l'Econométrie (année universitaire 1993-94) et le cours de Rappels Mathématiques (année universitaire 1994-95) aux élèves de l'I.U.P. d'ingénierie économique de la faculté de Nice.

J. Leblond et J.-B. Pomet ont assuré le cours d'automatique du D.E.A. "Vision et Robotique" organisé par l'Université de Nice et l'INRIA.

C. Lobry et S. Touzeau ont enseigné à *l'Ecole d'été sur les modèles et les problèmes mathématiques appliqués à la gestion des ressources renouvelables*, organisée à Agadir du 15 au 30 juillet, dans le cadre du programme Med-Campus (n° 237 Med-Biomath) de la Communauté Européenne.

J.-B. Pomet et Laurent Baratchart assurent un cours "étude qualitative de systèmes dynamiques commandés" dans le D.E.A. "Systèmes dynamiques et turbulences" organisé par l'INLN.

O. Pourtallier a enseigné un cours de théorie des jeux à la faculté d'ingénierie économique de l'Université de Nice.

O. Pourtallier et M. Tidball ont organisé et enseigné dans un groupe de travail portant sur la théorie des jeux en économie. Le but de ce groupe de travail, commun avec le LATAPSES (CNRS, UMR 42), avait pour but une mise en commun de connaissances en vue de collaboration sur des problèmes de théorie des jeux en économie. Le thème abordé cet année portait sur la théorie des jeux répétés.

Trois thèses de doctorat ont de plus été soutenues : [3], [2] et [1].

6.2 Participation aux manifestations

L. Baratchart a présenté une communication au colloque organisé en l'honneur de M. Cotlar à Caracas (Venezuela) en Janvier 1994 (travaux communs avec F. Wielonsky), et une communication à *Constructive methods in function theory* organisée à Penang (Malaisie) en Mars 1994 (travaux communs avec E. B. Saff et F. Wielonsky).

P. Bernhard, J.L. Gouzé, J.-B. Pomet (en partie sur des travaux communs avec P. Morin, C. Samson et Z.-P. Jiang) et N. Torkhani (travaux communs avec L. Baratchart, J. Leblond et J. Partington) ont présenté des exposés au *33rd IEEE Conference on Decision and Control* en décembre (Floride, USA).

L. Baratchart (travaux communs avec M. Deistler), J. Leblond (travaux communs avec L. Baratchart, J. Partington et N. Torkhani) et J.-B. Pomet (travaux communs avec P. Laurent, J. Leblond, P. Dulbecco et J.-L. Gaffard) ont présenté des exposés à la 3ème réunion du groupe “Identification” du programme européen Science (Noordwijk, Pays-Bas, 21-23 septembre).

P. Bernhard, S. Le Ménec, O. Pourtallier, Alain Rapaport, Mabel Tidball ont participé à la “6 th international conference on dynamic games and applications”, Saint-Jovite, Quebec. Sept communications dont une conférence plénière ont été présentées par l’INRIA lors de cette conférence.

C. Lobry a participé à un workshop “Viabilité” organisé par J.P. Aubin à Fontevraud du 27 juin au 1 juillet.

J.-B. Pomet a participé régulièrement aux réunions du GdR “Automatique”, pôle non-linéaire.

J.-B. Pomet a été invité à présenter un exposé au workshop “Differential systems” organisé par le Fields Institute for Mathematical Research à l’Université de Toronto en décembre.

S. Touzeau a participé à la réunion *Interactions Economie Environnement*, tenue aux Houches du 26 au 28 mai 1994, organisée par Gérard Weisbuch et Guillemette Duchateau-Nguyen, Ecole Normale Supérieure (LPS). Elle a donné un exposé au séminaire “Développement viable” à l’Ecole Normale Supérieure.

F. Wielonsky (travaux communs avec L. Baratchart et M. Olivi) a présenté un exposé aux Journées complexes du Sud (Tantavel, France, novembre).

6.3 Activités extérieures

J. Leblond a été invitée pour quelques jours à l’Université de Louvain la Neuve (Belg.), à l’Université de Leeds (G.B.) et au LADSEB (Padoue, Ital.).

N. Torkhani a été invité pour deux semaines à l’Université de Leeds (G.B.).

J.-B. Pomet a été invité une semaine au CINVESTAV (Mexico), Seccion de Control Automatica.

L. Baratchart a été invité pour une semaine à la T.U. Wien et au CNR à Padoue, ainsi qu'à l'Université de Floride de sud (Tampa) et du Texas (Dallas).

7 Publications

Thèses

- [1] P. FULCHERI, *Approximation rationnelle matricielle dans H^2 et analyse de Schur. Application à l'identification des systèmes*, thèse de doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, décembre 1994.
- [2] S. L. MÉNEC, *Théorie des jeux dynamiques et techniques de programmation avancée appliquées au duel aérien à moyenne distance*, thèse de doctorat, Université de Nice Sophia-Antipolis, novembre 1994.
- [3] A. RAPAPORT, *Contribution à la théorie des jeux différentiels à deux joueurs et somme nulle avec différentes structures d'information*, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, septembre 1994.

Articles et chapitres de livre

- [4] P. BERNHARD, O. POURTALLIER, «Pursuit-evasion game with costly information», *Dynamics & Control* 4, 1994, p. 365–382.
- [5] J. BOISSONNAT, A. CEREZO, J. LEBLOND, «Shortest paths of bounded curvature in the plane», *Journal of Intelligent and Robotics Systems* 10, 1994, p. 1–16.
- [6] J.-L. GOUZÉ, K. P. HADELER, «Order Intervals and Monotone Flow», *Nonlinear World* 1, 1994, p. 23–34.
- [7] 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.
- [8] G. OLSDER, O. POURTALLIER, «Optimal selection of observation in a costly information game», *Annals of Dynamic Games II*, 1994.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [9] L. BARATCHART, A. GOMBANI, «A parametrization of external spectral factors», in : *10th IFAC Symposium on Identification and Parameter Estimation*, Copenhagen, July. 94, 1994.

- [10] L. BARATCHART, J. LEBLOND, J. PARTINGTON, N. TORKHANI, «Robust identification from partial frequency data», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (Floride, U.S.A.), dec 1994.
- [11] O. BERNARD, J.-L. GOUZÉ, «Transient behavior of biological Models as a tool for qualitative validation», *in: Second European Conference on Mathematics applied to Biology and Medicine*, P. Auger, J. Demongeot (éd.), Lyon, dec. 93, Wuertz, 1994.
- [12] P. BERNHARD, A. RAPAPORT, «Example of planar imperfect information pursuit-evasion game», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, julliet 1994, 1994.
- [13] P. BERNHARD, «Minimax versus stochastic partial information control», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (Floride, U.S.A.), dec 1994.
- [14] J.-L. GOUZÉ, «Global stabilization of n-dimensional population models by a positive control», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (Floride, U.S.A.), décembre 1994.
- [15] J.-L. GOUZÉ, «Positivity, Space Scale, and Convergence towards the Equilibrium», *in: Second European Conference on Mathematics applied to Biology and Medicine*, P. Auger, J. Demongeot (éd.), Lyon, dec. 93, Wuertz, 1994.
- [16] H. HJALMARSSON, M. GEVERS, F. D. BRUYNE, J. LEBLOND, «Identification for control : closing the loop gives more accurate controllers», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (Floride, U.S.A.), dec 1994.
- [17] Z.-P. JIANG, J.-B. POMET, «Combining backstepping and time-varying techniques for a new set of adaptive controllers», *in: 33rd IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (U.S.A.), décembre 1994.
- [18] C. LOBRY, «Automates cellulaires et modélisation de la forêt», *in: Actes du groupe de travail sur la forêt guyanaise*, 1994.
- [19] C. LOBRY, «Negative feedback and control of renewable ressources», *in: Environment, economics and their mathematical models*, J. Diaz, J. Lions (éd.), Masson, 1994.
- [20] S. L. MÉNEC, P. BERNHARD, «Theory of differential games and symbolic programming», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, julliet 1994, 1994.
- [21] P. MORIN, C. SAMSON, J.-B. POMET, Z.-P. JIANG, «Time-varying Feedback Stabilization of the Attitude of a Rigid Spacecraft with two

- controls», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (U.S.A.), décembre 1994.
- [22] D. NEVEU, J. NICOLAS, O. POURTALLIER, J. PIGNON, A. RAIMONDO, «Pursuit games with costly information: Application to the ASW helicopter versus submarine game», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, juillet 1994, 1994.
- [23] G. OLSDER, O. POURTALLIER, «Optimal selection of observation times in a costly information game», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, juillet 1994, 1994.
- [24] J.-B. POMET, C. SAMSON, «Exponential Stabilization of Nonholonomic Systems in Power Form», *in: IFAC Symposium on Robust Control Design*, Rio de Janeiro (Brésil), septembre 1994.
- [25] J.-B. POMET, «Infinite Dimensional Differential Geometry for Dynamic Feedback», *in: 33ème IEEE Conf. on Decision and Control*, Orlando (U.S.A.), décembre 1994.
- [26] O. POURTALLIER, M. TIDBALL, «Approximation of the value function for a class of differential games with target», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, juillet 1994, 1994.
- [27] M. TIDBALL, E. ALTMAN, «Approximations in dynamics zero-sum games», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, juillet 1994, 1994.
- [28] M. TIDBALL, «Undiscounted zero sum differential games with stopping times», *in: Sixth International Symposium on Dynamics Games and Applications*, M. Breton, G. Zaccour (éd.), St-Jovite, Québec, Canada, juillet 1994, 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [29] E. ARANDA-BRICAIRE, C. MOOG, J.-B. POMET, «An Infinitesimal Brunovsky Form for Nonlinear Systems with Applications to Dynamic Linearization», *Rapport de Recherche n°2313*, INRIA, 1994, To appear in a book on “Geometry in Nonlinear Control”, B. Jakubczyk Ed., Banach Center Publications.
- [30] L. BARATCHART, J. LEBLOND, J. PARTINGTON, «Hardy approximation to L^p functions on subsets of the circle», *Rapport de recherche n°2377*, INRIA, octobre 1994.

- [31] J. BOISSONNAT, A. CEREZO, J. LEBLOND, «A note on shortest paths in the plane subject to a constraint on the derivative of the curvature», *Rapport de recherche n°2160*, INRIA, janvier 1994.
- [32] K. CHAOUACHE, «Comportement asymptotique des systèmes de Lotka-Volterra», *Rapport de stage de fin d'études*, Ecole Centrale de Paris, 1994.
- [33] L. DELRIEU, J. MAERFELD, «Logiciel interactif de Lissage de courbes», *Rapport de stage de maîtrise informatique*, Université de Nice, 1994.
- [34] H. ELMOZNINO, «Connection Machine et automates cellulaires», *rapport de recherche*, Université de Nice, 1994.
- [35] A. FAHRI, «Approximation dans les espaces de Hardy avec poids», *Rapport de stage*, Ecole des Mines de Saint Etienne, 1994.
- [36] Z.-P. JIANG, J.-B. POMET, «A note on “Robust control of nonlinear systems with input unmodeled dynamics”», *Rapport de Recherche n°2293*, INRIA, 1994.
- [37] P. LAURENT, «Développement et simulation d'un modèle dynamique de comportement de l'entreprise», *Rapport de stage*, ESSI, Univ. Nice Sophia-Antipolis, 1994.
- [38] J. MAERFELD, «Logiciel interactif de simulation de populations marines spatialisées», *Rapport de stage*, Université de Nice, 1994.
- [39] J.-B. POMET, «A Differential Geometric Setting for Dynamic Equivalence and Dynamic Linearization», *Rapport de Recherche n°2312*, INRIA, 1994, To appear in a book on “Geometry in Nonlinear Control”, B. Jakubczyk Ed., Banach Center Publications.
- [40] M. TIDBALL, O. POURTALLIER, E. ALTMAN, «Approximations in dynamic zero-sum games, II», *Rapport de recherche n°2348*, INRIA, 1994.

8 Abstract

The endeavour of the project is to develop constructive methods in the analysis and optimization of controlled dynamical systems. The main topics presently under investigation are :

- Approximation in the complex domain with applications to identification of linear systems.
- Control and structural properties of some classes of nonlinear dynamical systems.

Rapport d'activité INRIA 1994 — Annexe technique

- Study of the qualitative behaviour of certain differential equations arising in biological sciences ; modelling and control in ecology and environmental sciences.
- Dynamical games, optimal and robust control.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	3
3	Actions de recherche	3
3.1	Identification harmonique et approximation de matrices de transfert	3
3.1.1	Approximation de fonctions de transfert dans une bande de fréquence	4
3.1.2	Application à l'identification de filtres hyperfréquences	6
3.1.3	Application à l'annulation d'écho	6
3.1.4	Application à l'identification robuste	7
3.1.5	Approximation rationnelle de fonctions de transfert	8
3.1.6	Approximation rationnelle scalaire	9
3.1.7	Approximation rationnelle matricielle	10
3.1.8	Approximation pondérée de fonctions de transfert scalaires	11
3.1.9	Caractérisation des traces des espaces de Hardy sur un arc de cercle	12
3.2	Structure et commande des systèmes non-linéaires	12
3.2.1	Etude qualitative de la stabilisation périodique de systèmes mécaniques non-holonomes	12
3.2.2	Transformations dynamiques des systèmes non-linéaires	13
3.3	Modélisation et contrôle en biologie et environnement	15
3.3.1	Modélisation de la croissance du plancton en laboratoire	15
3.3.2	Dynamique et contrôle de la pêche et de l'aquaculture	16
3.3.3	Dynamique de la forêt	17

3.3.4	Mathématiques de la modélisation	18
3.4	Jeux différentiels et commande H^∞ optimale	18
3.4.1	Jeux de poursuite avec information discrète	19
3.4.2	Commande MiniMax en information imparfaite	19
3.4.3	Jeux dynamiques et programmation Avancée	19
3.4.4	Calcul numérique de la fonction valeur d'un jeu différentiel en information parfaite	20
3.4.5	Approximations des jeux stochastiques	20
3.5	Divers	21
3.5.1	Synthèse de contrôleurs optimaux et sous-optimaux	21
3.5.2	Planification de trajectoires	21
3.5.3	Modélisation d'entreprises	22
4	Actions Industrielles	23
5	Actions nationales et internationales	23
5.1	Actions internationales	23
5.2	Actions nationales	24
5.2.1	Organisation de séminaires	25
5.2.2	Invitations	25
6	Diffusion des résultats	25
6.1	Actions d'enseignement	25
6.2	Participation aux manifestations	26
6.3	Activités extérieures	27
7	Publications	28
8	Abstract	31