

Rapport INRIA 1994 — Programme 5

Contrôle géométrique des systèmes non linéaires

Projet CONGE

3 mai 1995

Projet CONGE

Contrôle géométrique des systèmes non linéaires

Localisation : *Metz*

Mots-clés : automatique non linéaire (1), capteur logiciel (5), commande de processus (1), environnement (1), équation différentielle (1), équation différentielle stochastique (1), feedback non linéaire (1, 3), filtrage non linéaire (1, 5), identification de paramètres (1, 5), modélisation en biologie (1), observateur (1, 5), réacteur chimique et biologique (5), robustesse au bruit (1), stabilisation de système non linéaire (1, 3).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Gauthier Sallet, Professeur université de Metz

Responsable permanent

Jean-Claude Vivalda, CR Inria

Secrétaire

Evelyne Agostini

Personnel Inria

Abderrahman Iggidr, CR

Cheng Zhong Xu, CR

Personnel Université

Philippe Adda, Maître de conférences, université de Nancy II
Rachid Chabour, Maître de conférences, université de Metz
Patrick Florchinger, Maître de conférences, université de Metz
Abdelhak Ferfera, ATER, université de Metz
Rachid Outbib, ATER, université de Metz
Edouard Richard, Maître de conférences, CRAN Longwy

Chercheurs doctorant

Martine Clavier, Professeur Agrégée
Hamadi Jerbi, Boursier Franco-Tunisien, jusqu'au 30 octobre 1994
Mohamed Hammami, Boursier tunisien
Hassan Laousy, Chercheur
Abderazak Belhaouta, Boursier Marocain
Mohamed Oumoun, Boursier Marocain

Collaborateur extérieurs

Erik Verriest, Professeur Georgia Tech

2 Présentation du projet

Le projet CONGE est un projet commun de l'URA 399 de l'Université de Metz, et de l'INRIA. Tous ses chercheurs sont rattachés à la section 07 du CNRS.

L'activité du projet est l'application de l'Automatique non linéaire à la résolution de problèmes issus de l'industrie. Les thèmes centraux particuliers du projet concernent la commande de systèmes non linéaires. Le projet participe aux recherches théoriques entamées depuis une vingtaine d'années qui ont pour but de maîtriser des systèmes non linéaires. Mais avant de pouvoir commander il s'agit de modéliser de façon réaliste, puis d'identifier, observer et enfin appliquer une commande rétroactive qui réalisera un but désiré.

Si seuls quelques thèmes sont centraux dans le projet, la considération de certains problèmes conduira à l'utilisation de techniques de l'automatique qui ne ressortiront pas forcément de ces thèmes.

Les recherches du projet CONGE s'articulent en, quatre thèmes.

3 Action de recherche

3.1 Stabilisation par retour d'état de systèmes non linéaires

La stabilisation par retour d'état de systèmes non linéaires est un thème qui a été beaucoup étudié et qui fait encore l'objet d'une intense recherche scientifique internationale. Depuis trois ans, notre équipe a développé une expertise sur ce problème et même s'il sera toujours présent dans le projet, son importance devrait diminuer dans les années futures.

3.1.1 Stabilisation par feedbacks dynamiques

Participants : Gauthier Sallet, Abderrahman Iggidr, Rachid Outbib.

La stabilisation par feedback dynamique consiste grossièrement à ajouter des intégrateurs. Plus précisément si l'on cherche à stabiliser par un feedback $u(x)$ le système

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u) \quad (1)$$

il est souvent plus facile d'essayer de stabiliser le système (2)

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, g(x, y)) \\ \dot{y} = u \end{cases}$$

En fait nous avons montré qu'il existait des systèmes du type (1) qui n'étaient pas stabilisables par un feedback continu, mais par contre le système (2) associé était stabilisable par un feedback polynomial.

Ces techniques ont été appliquées à des systèmes classiques, systèmes en cascade, systèmes composites partiellement linéaires, ainsi qu'à des systèmes dérivés de systèmes mécaniques.[7, 17]

3.1.2 Fluid Power

Participants : Edouard Richard, Gauthier Sallet, Rachid Outbib.

Les techniques hydrauliques et pneumatiques sont employées depuis de nombreuses années dans les applications imposant un contrôle précis

de grandeurs mécaniques (position, vitesse, force) et mettant en jeu des puissances élevées. Les systèmes et les composants électropneumatiques et électrohydrauliques pour des puissances plus faibles sont en développement constant.

Les modèles de ces procédés, qui reposent principalement sur les lois de la mécanique des fluides, sont non linéaires. L'utilisation d'interfaces électrohydrauliques ou électropneumatiques permet de disposer de variables de commandes de nature électrique et par conséquent d'envisager des lois de commande performantes. L'étude d'un système électropneumatique constitué de deux servovalves trois voies, d'un vérin sans fuite et sans frottement avec une charge purement inertielle a permis de considérer des techniques développées dans le projet et de proposer des commandes par feedback. Des systèmes électrohydrauliques ont également été étudiés avec des résultats similaires [16]. Le travail actuel consiste à tenir compte des fuites des efforts résultants, ainsi qu'à l'extension du domaine de validité de la commande. Les applications seraient dans les systèmes de positionnement multi-axes, les moteurs hydrauliques pour la commande de vitesse, le contrôle de pression dans les presses hydrauliques.

3.1.3 Systèmes dissipatifs

Participants : Edouard Richard, Gauthier Sallet, Rachid Outbib.

Des résultats sur les systèmes à dérive dissipative issus de la mécanique, sur les systèmes homogènes ont été obtenus. Il s'agit de systèmes qui dissipent de l'énergie. Des applications à l'environnement sont en cours.[18, 29, 30]

L'utilisation de fonctions semi-définies positives est en cours de recherche.

3.1.4 Stabilisation de systèmes biochimiques.

Participants : Jean-Claude Vivalda, Abderrahman Iggidr, Rachid Chabour, Gauthier Sallet.

On s'intéresse à la commande non linéaire de réacteurs biologiques ; en particulier à la fermentation semi-continue de levure ainsi qu'à un autre bioprocédé : la transformation du lactose en acide lactique.

On cherche à calculer une commande optimisant le procédé, c'est à dire suivre une consigne de concentration en glucose optimisant la production de levure dans le premier cas et la production d'acide lactique dans le deuxième cas.

3.1.5 Stabilisation de systèmes stochastiques

Participants : Patrick Florchinger, Jean-Claude Vivalda, Abderrahman Iggidr, Rachid Chabour, Abdelhak Ferfera.

La stabilisation de systèmes stochastiques est abordée dans l'optique de l'étude de la robustesse au bruit. Les résultats obtenus concernent les calcul de feedbacks stabilisant pour des équations différentielles stochastiques contrôlées. La méthode utilisée repose sur les théorèmes de Lyapunov stochastiques. Une comparaison avec les méthodes utilisant les exposants de Lyapunov est en cours de développement, ainsi que la stabilisation par utilisation d'un bruit blanc. [5, 4, 10, 13, 11, 12, 28]

3.2 Observateurs et filtrage

Participants : Jean-Claude Vivalda, Abderrahman Iggidr, Gauthier Sallet, Rachid Chabour, Patrick Florchinger

Ce thème est celui qui aura le plus de développement dans les années futures.

Une fois qu'un système non linéaire a été modélisé, il reste souvent à déterminer la valeur des paramètres du système. C'est en particulier le cas des réacteurs biologiques où le problème est difficile en pratique. En plus il faut également estimer l'état du système, c'est à dire reconstruire l'évolution temporelle des variables d'état non mesurées à partir de celles mesurées. Un algorithme qui réalise cet objectif s'appelle un observateur. Le thème de l'observation non linéaire est un thème stratégique pour la commande par rétroaction. Un observateur efficace, convergeant rapidement, peu sensible au bruit peu fournir une alternative pour les procédés pour lesquels il n'existe pas de capteurs fiables et rapides. On pourra alors parler de véritables capteurs logiciels. Les bioprocédés constituent une application de choix car très souvent les mesures sont peu nombreuses, incertaines et bruitées.

Dans certains cas des paramètres du système peuvent être estimés par un observateur non linéaire, en introduisant une variable d'état sup-

plémentaire qui est le paramètre à estimer. Quand cette solution est possible l'estimation est efficace et permet de résoudre le problème de l'identifiabilité du système.

La sensibilité au bruit d'un observateur est importante, elle est étudiée en relation avec le filtrage.

3.2.1 Observateurs de systèmes biologiques

Participants : Jean-Claude Vivalda, Abderrahman Iggidr, Rachid Chabour, Gauthier Sallet.

Les réacteurs biologiques ou biochimiques sont de bons modèles pour l'utilisation des observateurs. Les systèmes étudiés sont des modèles de production de levure en présence d'éthanol, des modèles de réduction du lactosérum, un modèle de production d'algues en chemostat (dans le cadre du GDR environnement). Un projet de collaboration avec l'Ifremer est à l'étude pour la production d'algues pour la pharmacologie.

3.2.2 Filtrage non linéaire

Participant : Patrick Florchinger.

De nouveaux résultats pour l'unicité de la solution d'équations aux dérivées partielles stochastiques avec coefficients non bornés permettent semble-t-il d'obtenir de nouveaux résultats d'unicité pour la solution de l'équation de Zakai associée à des problèmes de filtrage avec bruits dépendants et coefficients d'observation non bornés.

3.3 Stabilisation par retour d'état estimé par observateur

Participants : Jean-Claude Vivalda, Abderrahman Iggidr, Mohamed Hammami, Abdelhak Ferfera, Cheng-Zhong Xu, Gauthier Sallet.

Cette action de recherche est la synthèse des deux précédentes. On se propose de stabiliser un système par retour de sortie. Plus précisément, on construit un observateur ou une classe d'observateurs qui estimeront l'état du système par une approximation \hat{x} . La classe des feedbacks stabilisant du 3.1 fournit des fonctions $x \mapsto u(x)$ dépendant de l'état. Que se passe-t-il si, au lieu d'appliquer le feedback $x \mapsto u(x)$, on applique le retour de sortie $u(\hat{x})$? Le système obtenu est-il stable ? Si c'est le cas

on parle de principe de séparation. On arrive à obtenir des résultats de séparation quand l'observateur est exponentiel et quand les feedbacks sont obtenus par des techniques à la Lyapunov-Lasalle.

Des résultats sur des systèmes partiellement linéaires ont été obtenus, ainsi que sur des systèmes non linéaires composites. L'introduction de modèles stochastiques a été également fait sur les exemples précédents. Les recherches concernent également les réacteurs biologiques et biochimiques. Un aspect minimisation des calculs, robustesse au bruit est non négligeable.[23, 24]

3.4 Systèmes hybrides

Participants : Cheng-Zhong Xu, Hassan Laousy, Hamadi Jerbi, Gauthier Sallet.

L'objectif de ce thème de recherche est d'étudier la dynamique et la commande de systèmes hybrides, *i.e.* des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles et ordinaires. Les précédentes années ont été consacrées à l'étude de systèmes issus de l'aérospatial, la robotique et le génie des procédés. Les techniques Lyapunov-Lasalle utilisée en dimension finie se sont révélées utiles dans ce contexte avec les adaptations nécessaires [21]. Le contrôle d'un système rigide en rotation a été poursuivi, mais en considérant la stabilisabilité par une force et un moment ponctuel, au lieu du couple comme ce qui avait été fait les années précédentes.

L'étude des systèmes à paramètres distribués de la forme

$$\dot{X}(t) = AX(t) + bu(t)$$

initiée l'année dernière a abouti. Nous sommes capables d'obtenir une stabilisation exponentielle dans certains cas par des feedbacks linéaires bornés, avec vecteur d'entrée non-admissible [20]. Des applications ont été données pour des structures flexibles avec contrôle frontière. La suite des recherches concernera des systèmes non linéaire en portant l'accent sur les notions de contrôlabilité et d'observabilité et de stabilisabilité. En particulier des systèmes thermiques et mécaniques sont considérés, ainsi que des réacteurs biologiques à membrane qui donnent des modèles ressortant de cette problématique.

Un sujet également à l'étude est la construction d'observateurs pour de tels systèmes [22, 19].

4 Actions nationales et internationales

4.1 Actions nationales

Le projet participe aux travaux du Pôle non linéaire du GR automatique (CNRS). Ce GR doit évoluer naturellement en PRC-GDR automatique. Le projet CONGE y trouvera sa place en particulier dans les OST (objectifs scientifiques et techniques): Observateurs, Automatique et génie des procédés, automatique et systèmes biologiques.

Le projet CONGE est membre fondateur du nouveau GDR "Modèles de l'automatique pour les écosystèmes et la dynamique des ressources renouvelables" dirigé par C. Lobry. Des collaboration avec l'IFREMER se font à travers ce GDR.

Il mène une collaboration avec le centre d'Automatique et Systèmes (CAS) de l'École des Mines de Paris dans le cadre de la convention ARMINES / INRIA.

Le projet CONGE collabore de façon systématique avec les projets MIAOU (Sophia-Antipolis) et MEPHISTO(Sophia-Antipolis)

CONGE collabore avec le LAGEP Lyon, Le LSGC Nancy sur les problèmes d'automatique non linéaire dans les réacteurs chimiques ou biologiques. Une thèse co-dirigée (CONGE-LSGC) sur des réacteurs biologiques va commencer, le chercheur venant du LAGEP.

Enfin, des échanges et des collaborations ont lieu avec l'Université d'Orléans (filtrage sur les variétés), l'Université de Strasbourg (noyau de la chaleur ...), l'Université de Rouen (ERASMUS / Observateurs), l'Université de Dijon (ERASMUS), de Chambéry (ERASMUS), de Grenoble (LAG / Observateurs) et l'Université de Lyon (LAGEP et INSA), le LSS (modèles biologiques,identification), l'INSA-Rouen (Observateurs).

Le projet a organisé une conférence d'Analyse Stochastique (responsable: P. Florchinger) du 6 au 8 avril 1994.

Un workshop sur les problèmes d'identification en éco-biologie a été organisé à Sophia, dans le cadre du GDR "Modèles de l'automatique pour les écosystèmes et la dynamique des ressources renouvelables" (G. Sallet responsable scientifique)

G. Sallet est membre du comité de direction du GDR "Modèles de l'automatique pour les écosystèmes et la dynamique des ressources

renouvelables”, et fait partie du comité de lecture des publications ”mathématiques et applications ” de la SMAI.

4.2 Actions internationales

Collaboration scientifique:

Université Mc Gill (Peter Caines), Université de Rutgers (HJ Sussmann, E. Sontag), Banach Center (L. JcuΦΦacubczyk), Université de Toronto (V. Jurdjevic, I. Kupka) Université de Californie du sud (B. Rozovskii), Georgia tech (E. Verriest), Université de Minsk (Kalitine)

5 Diffusion des résultats

5.1 Enseignement

G. Sallet enseigne le cours de contrôle des systèmes non linéaires du DEA de mathématiques appliquées de Université de Metz, P. Florchinger le cours de stabilité stochastique.

5.2 Participation à des conférences et colloques

Des membres de l'équipe ont participé à des conférences et *workshops* ; on se reportera à la bibliographie pour en avoir la liste.

6 Publications

Thèses

- [1] H. JERBI, *Stabilisation d'une classe de systèmes non linéaires*, thèse de doctorat, université de Metz, juin 1994.
- [2] P. FLORCHINGER, *habilitation à diriger des recherches*, thèse de doctorat, université de Metz, juin 1994.
- [3] R. OUTBIB, *Sur la stabilisation globale de systèmes non linéaires par retour d'état régulier*, thèse de doctorat, université de Metz, janvier 1994.

Articles et chapitres de livre

- [4] A. ESTRADE, M. PONTIER, P. FLORCHINGER, «Feedback stabilization of stochastic nonlinear composite systems», *J. Stochastic analysis and applications 4*, 1994, p. 453–472.
- [5] A. FERFERA, A. IGGIDR, «Feedback stabilization of stochastic nonlinear composite systems», *Appl. Math Lett.* 7, 3, 1994, p. 45–49.
- [6] A. FERFERA, A. IGGIDR, «A remark on the stabilization of partially composite systems», *IEEE Trans. Automatic Control*, 1994.
- [7] A. IGGIDR, G. SALLET, «Nonlinear stabilisation by adding integrators», *Kybernetika*, 1994, p. 499–506.
- [8] A. IGGIDR, J. VIVALDA, «Stabilization of a class of multi-inputs nonlinear systems», *Systems Control Lett.*, 1994, p. 407–417.
- [9] M. HAMMAMI, H. JERBI, «On the stabilization of homogeneous cubic vector fields in the plane», *Applied Math Lett.* 7, 4, 1994, p. 95–99.
- [10] P. FLORCHINGER, A. IGGIDR, G. SALLET, «Stabilization of a class of nonlinear systems», *stochastic processes and their applications*, 1994, p. 235–243.
- [11] P. FLORCHINGER, «On the stabilization of stochastic bilinear systems», *J. Stochastic Analysis and applications 12*, 5, 1994, p. 527–542.
- [12] P. FLORCHINGER, «Stability of systems with uncertain time delays», *Systems Control Lett.*, 1994.
- [13] P. FLORCHINGER, «A stochastic version of Jurdjevic-Quinn theorem», *J. Stochastic Analysis and applications 12*, 4, 1994, p. 473–480.
- [14] R. CHABOUR, A. FERFERA, «Noninteracting control with singularity of a class of bilinear systems», *Nonlinear Analysis TMA.*, 1995.
- [15] R. CHABOUR, G. SALLET, J. VIVALDA, «Stabilization of two dimensional systems :a bilinear approach», *MCSS 6*, 1994, p. 224–246.
- [16] R. OUTBIB, E. RICHARD, «State feedback stabilization of an electropneumatic system», *ASME Trans. J. Dynamic Systems*, 1995.
- [17] R. OUTBIB, G. SALLET, «A reduction principle for the stabilization of systems», *Systems Control Lett.*, 1994.
- [18] R. OUTBIB, J. VIVALDA, «Stabilization of the angular velocity of the rigid body about the middle axis», *Appl. Math Lett.* 7, 2, 1994, p. 45–48.
- [19] C. XU, J.-P. GAUTHIER, A. BOUNABAT, «An observer for infinite dimensional skew-adjoint bilinear systems», *J. Mathematical Systems, Estimation and Control*, 1994.
- [20] C. XU, G. SALLET, «On spectrum and Riesz basis assignment of infinite dimensional systems», *SIAM J. Control Optim.*, 1995.

- [21] C. XU, H.JERBI, «A robust PI-Controller for infinite-dimensional systems», *International Journal of Control*, 1994.
- [22] C. XU, P.LIGARIUS, J.-P. GAUTHIER, «An observer for infinite dimensional dissipative bilinear systems», *Computer & Mathematics with applications*, 1994.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [23] A.FERFERA, M.A.HAMMAMI, «Stabilization of a class of nonlinear systems using an observer design», *in: Proceedings of the 32nd IEEE-CDC*, Nantes, 1995.
- [24] A.FERFERA, M.A.HAMMAMI, «Stabilization of composite nonlinear systems by an estimated state feedback law», *in: Proceedings of the NOLCOS 95*, Tahoe city,CA, 1995.
- [25] A.IGGIDR, «Feedback stabilization of homogeneous polynomial systems», *in: Proceedings of the NOLCOS 95*, Tahoe city,CA, 1995.
- [26] H.JERBI, M. HAMMAMI, J. VIVALDA, «On the stabilization of affine systems», *in: Proceedings of the IEEE-CSS mediterranean symposium*, p. 311-319, crete,Grèce, 1994.
- [27] P.FLORCHINGER, «Lyapunov-like techniques for stochastic stability», *in: Proceedings of the 33th IEEE-CDC 94*, Orlando,Fl, 1994.
- [28] P.FLORCHINGER, «Stabilisation of partially bilinear composite stochastic systems», *in: Proceedings of the 33th IEEE-CDC 94*, Orlando,Fl, 1994.
- [29] R.OUTBIB, J. VIVALDA, «The Jurdjevic-Quinn theorem for smooth non-analytic systems», *in: Proceedings of the NOLCOS 95*, Tahoe city,CA, 1995.
- [30] R.OUTBIB, «On global feedback stabilization of the angular velocity of a rigid body», *in: Proceedings of the 33th IEEE-CDC 94*, Orlando,Fl, 1994.

7 Abstract

The CONGE project is devoted to research in the field of nonlinear control system. among the different topics of nonlinear control system theory the project focusses especially on stabilization by state feedback, state observers and filters (software sensors), stabilization in an observer design (ie stabilization by an estimated state feedback, the estimation given by an observer), robustness to noise measurement, and hybrid system, ie systems governed by nonlinear systems with some

distributed parameters. the systems considered are issued by industrial problems such that bio-reactors, chemical tank reactors, mechanical systems, ecological systems.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	2
3	Action de recherche	3
3.1	Stabilisation par retour d'état de systèmes non linéaires .	3
3.1.1	Stabilisation par feedbacks dynamiques	3
3.1.2	Fluid Power	3
3.1.3	Systèmes dissipatifs	4
3.1.4	Stabilisation de systèmes biochimiques.	4
3.1.5	Stabilisation de systèmes stochastiques	5
3.2	Observateurs et filtrage	5
3.2.1	Observateurs de systèmes biologiques	6
3.2.2	Filtrage non linéaire	6
3.3	Stabilisation par retour d'état estimé par observateur . . .	6
3.4	Systèmes hybrides	7
4	Actions nationales et internationales	8
4.1	Actions nationales	8
4.2	Actions internationales	9
5	Diffusion des résultats	9
5.1	Enseignement	9
5.2	Participation à des conférences et colloques	9
6	Publications	9
7	Abstract	11