



ÉCOLE
CENTRALE LYON



Projet SystHeI

Vers l'analyse et la synthèse efficaces des Systèmes Hétérogènes Interconnectés : application à l'estimation de signaux

Thèse de Doctorat en Automatique et Traitement du Signal

(English version on page 5)

Mots-clés

Automatique - Théorie des systèmes dynamiques - Traitement du Signal - Systèmes interconnectés
- Filtres d'estimation - Optimisation convexe

Informations pratiques

- Localisation : Ecole Centrale de Lyon, France
- Durée : 36 mois démarrant entre le 01/09/2024 et le 01/11/2024
- Date limite de candidature : 05/05/2024

Equipe d'encadrement

Anton KORNIENKO (directeur de thèse), Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Gérard SCORLETTI, Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Arthur PERODOU, Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Contact : [anton.korniienko](mailto:anton.korniienko@ec-lyon.fr) ; [gerard.scorletti](mailto:gerard.scorletti@ec-lyon.fr) ; [arthur.perodou](mailto:arthur.perodou@ec-lyon.fr)@ec-lyon.fr

Profil recherché

Tout·e candidat·e, titulaire d'un diplôme d'ingénieur·e ou d'un master, avec un **excellent dossier académique**, de cursus **spécialisé en Automatique et/ou Traitement du Signal OU de cursus généraliste** avec de bonnes compétences en **Mathématiques Appliquées**. Un intérêt dans le développement de méthodes à base d'optimisation et une expertise en MATLAB seraient aussi appréciées.

Contexte de travail du doctorat

L'École Centrale de Lyon (ECL) est un établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel. Membre du Groupe des Ecoles Centrales et du réseau des Écoles Nationales d'Ingénieurs, l'ECL forme des ingénieur·es généralistes de haut niveau, des ingénieur·es de spécialité, des étudiant·es en master et des docteur·es. L'établissement accueille 2500 élèves-ingénieur·es (étudiant·es et apprenti·es), 300 étudiant·es en master et plus de 250 doctorant·es. Il est caractérisé par une recherche reconnue adossée à 6 laboratoires de recherche. L'activité de recherche de l'ECL est orientée vers et pour le monde économique au travers de nombreux contrats industriels.

Le laboratoire Ampère est une unité mixte de recherche (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Lyon 1) de plus de 150 chercheur·euses basée à Lyon, France, qui travaille sur l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les systèmes en relation avec leur environnement. Les travaux de recherche conduits au département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS) concernent le développement de méthodologies et d'outils visant l'optimisation et la maîtrise du comportement dynamique des systèmes et ce dans de très nombreux domaines d'applications, en collaboration avec les autres départements du laboratoire et d'autres laboratoires en sciences de l'ingénieur·e. L'association des dimensions théoriques et appliquées de ces recherches constitue sa grande originalité.

L'équipe d'encadrement a travaillé au cours des dernières années sur les possibilités offertes par les approches d'Automatique et de Traitement du Signal pour le développement de méthodes de conception/compréhension des systèmes relevant de différentes disciplines (Electronique, Energie Electrique, Mécanique, Biologie, etc.). En particulier, une expertise a été développée sur la conception de systèmes obtenus par l'interconnexion de sous-systèmes, pour lesquelles la combinaison de l'approche entrée-sortie avec des outils d'optimisation (convexe [BTN01,BV04]) apparaît particulièrement efficace. Des résultats probants ont déjà été obtenus, allant de contributions méthodologiques en amont (ex : [PKZS23,ACPKS23,LKD⁺17]) jusqu'à leur application sur des problématiques avec un fort intérêt pratique (ex : [PKS⁺21,KSCB16,GFS11]), et même au dépôt de brevet (ex : [PKZ⁺17,CGK10,CK13]).

Contexte scientifique du projet

L'intégration en cours des technologies de l'information dans les systèmes d'ingénierie modifie radicalement les possibilités dans un large spectre d'application (production et distribution d'énergie, télécommunications, transport de biens et de personnes, industrie 4.0, médecine, bâtiments intelligents, ...) mais au prix d'une **augmentation drastique de la complexité des problèmes de conception associée**. En plus de devoir satisfaire des **exigences toujours plus strictes** voire nouvelles (performance, sûreté, sécurité, efficacité énergétique, coût, ...), il s'agit de prendre en compte explicitement la **complexité de l'interconnexion** (grande dimension, communication détériorée, interface vivant-machine, ...) de **systèmes intrinsèquement**

complexes et de nature hétérogène. Pour faire face à ces défis, les méthodes traditionnelles de conception, à base de simulations et d'une approche essais-erreurs, apparaissent bien souvent limitées et il est devenu nécessaire de développer des méthodes adaptées permettant une conception efficace.

L'Automatique et le Traitement du Signal apparaissent comme des candidats naturels pour le développement de telles méthodes d'aide à la conception. Représentants de la cybernétique et de la théorie de l'information dans la branche des sciences de l'ingénieur·e, ces deux disciplines apportent les **visions complémentaires Système et Signal** nécessaires pour appréhender toute la complexité des problèmes de conception. En plus d'**établir des passerelles entre les disciplines**, leur **formalisme abstrait** permet à la fois de **représenter les systèmes et leur interconnexion** tout en étant adapté à la **prise en compte des contraintes pratiques des cahiers des charges**. Les systèmes sont représentés comme des sous-systèmes interagissant entre eux et avec leur environnement par le biais de signaux. Des contraintes sont alors imposées à ces signaux afin de caractériser les sous-systèmes et leur interconnexion, mais aussi pour la traduction du cahier des charges.

Afin de pouvoir gérer la complexité de conception des systèmes modernes, **l'utilisation de la puissance de calcul des ordinateurs** apparaît comme indispensable. Certains objectifs contradictoires apparaissent alors (temps de calcul, optimalité de la solution, temps de conception et d'implémentation de l'algorithme utilisé, ...). Pour le/la chercheur·euse en sciences de l'ingénieur·e, amené·e à développer et comparer des méthodes pour différentes problématiques pratiques, un **bon compromis** est donné par l'utilisation de la classe de problèmes d'**optimisation convexe**. Cette classe est notamment connue pour avoir de bonnes propriétés de résolution numérique, permettant une **résolution efficace**, avec un temps de calcul compris entre quelques secondes à quelques minutes pour un problème de taille moyenne avec quelques centaines de variables d'optimisation, et facilement implémentable, ce qui a popularisé son utilisation dans les sciences de l'ingénieur [BTN01, BV04]. La difficulté principale dans l'utilisation de l'optimisation convexe réside dans la formulation du problème sous une telle forme, nécessitant bien souvent de développer des techniques de reformulation ou de relaxation.

Problématique et Objectif de la thèse

Dans ce contexte, il est proposé dans cette thèse de s'attaquer à la **problématique de l'analyse et la synthèse efficaces de systèmes hétérogènes interconnectés**. Cette problématique se retrouve notamment en pratique pour les systèmes à grande échelle (ex : réseaux de distribution d'énergie, réseaux de capteurs, réseaux de régulation des gènes, ...).

Une première stratégie pour attaquer cette problématique est de **considérer le système global**, et d'utiliser des **méthodes classiques** d'analyse et de synthèse. Cependant, dans le cas de systèmes à grande échelle, ce type d'approche va en général mener à des **problèmes d'optimisation de très grande taille**. Une deuxième stratégie consiste à **décrire le système global comme l'interconnexion de sous-systèmes**, modélisés par une caractérisation sur les signaux d'entrée et de sortie de chaque sous-système. Ce type d'approche a le mérite de **réduire considérablement la complexité des problèmes d'optimisation**. De plus, pour une application de synthèse de filtre d'estimation, cette idée permet de **réduire l'ordre des filtres** obtenus. Cette seconde stratégie a permis d'obtenir récemment des **résultats importants** dans le cas particulier de **sous-systèmes homogènes**, c'est-à-dire représentés par le même modèle (voir par exemple [ACPKS23, PKZS23, KSCB16]). Cependant, dans le cas plus général de **sous-systèmes hétérogènes**, cette approche tend à être **pessimiste** (ou *conservative* en anglais), c'est-à-dire ne permettant pas forcément de trouver une solution bien qu'il en

existe une. La principale cause suspectée de ce pessimisme est la caractérisation entrée-sortie qui est réalisée pour chaque sous-système indépendamment des autres, ce qui revient à faire implicitement l'**hypothèse (forte)** que les **sous-systèmes** sont **indépendants**, et donc que leur modèle ne partage aucune similitude.

L'**objectif** de cette thèse est de surmonter ce problème en explorant une idée originale : introduire de la **dépendance entre les caractérisations des sous-systèmes** pour prendre en compte des similitudes (ex : algébrique ou topologique) dans leurs modélisations. L'ambition est d'améliorer le **compromis complexité algorithmique vs pessimisme**, en trouvant un juste milieu entre les deux stratégies décrites précédemment. L'intérêt et la limite de cette idée seront en particulier illustrés sur une application de synthèse de filtre d'estimation de signaux.

Le principal verrou à lever sera la formalisation du type de dépendance entre les caractérisations des sous-systèmes pouvant être inclus dans les méthodes d'analyse et de synthèse (de filtre d'estimation) tout en gardant le caractère convexe des problèmes d'optimisation à résoudre. Une voie alternative à considérer sera l'utilisation de relaxations convexes.

Les contributions attendues étant essentiellement méthodologiques, les résultats seront principalement valorisés par des communications dans des conférences internationales et des publications dans des journaux de référence en Automatique.

Processus de recrutement

Les candidat·es intéressé·es, ou souhaitant plus d'information, sont vivement invité·es à se manifester en envoyant un mail contenant un CV + un court message de présentation et de motivation à l'équipe d'encadrement (voir adresses mails au début de ce document).

Le processus de recrutement se déroule en trois étapes :

1. **Candidature jusqu'au 05/05/2024. Audition au fil de l'eau** par l'équipe d'encadrement et sélection du/de la candidat·e.
2. Audition par le conseil de l'Ecole Doctorale EEA fin-Mai/début Juin.
3. Résultat final : première quinzaine de Juin.

Revenus et avantages

Rémunération de 2100€ brut mensuel¹. La personne recrutée le souhaitant aura aussi l'opportunité d'intervenir dans les enseignements de l'équipe Automatique et Traitement du Signal de l'Ecole Centrale de Lyon, s'assurant ainsi un complément de salaire tout en profitant d'une expérience valorisable par la suite.

Perspectives professionnelles après le doctorat

Le/La docteur·e développera un ensemble de compétences qui seront valorisables dans de nombreux environnements professionnels. Sont notamment ciblés les métiers suivants : chercheur·euse, docteur·e-ingénieur·e, ingénieur·e R&D dans un établissement public ou dans le secteur privé, selon la formation initiale et les centres d'intérêts de la personne recrutée.

1. voir <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-financement-doctoral-46472>



ÉCOLE
CENTRALE LYON



Project SystHeI

Towards efficient analysis and synthesis of Heterogeneous Interconnected Systems : application to signal estimation

PhD thesis in System, Control and Signal Processing

Keywords

System and Control Theory - Signal Processing - Interconnected systems - Estimation filters - Convex Optimization

Practical Information

- Localization : Ecole Centrale de Lyon, Lyon (France)
- Duration : 36 month starting between 01/09/2024 and 01/11/2024
- Application deadline : 05/05/2024

Advisors

Prof. Anton KORNIENKO (thesis director), Ecole Centrale de Lyon, Ampère-lab

Prof. Gérard SCORLETTI, Ecole Centrale de Lyon, Ampère-lab

Dr. Arthur PERODOU, Ecole Centrale de Lyon, Ampère-lab

Contact : [anton.kornienko](mailto:anton.kornienko@ec-lyon.fr) ; [gerard.scorletti](mailto:gerard.scorletti@ec-lyon.fr) ; [arthur.perodou](mailto:arthur.perodou@ec-lyon.fr) }@ec-lyon.fr

Candidate profile

Any candidate holding an engineering degree or a Master's degree, with an **excellent academic record, specialized in System and Control or Signal Processing OR a general degree** with good skills in **Applied Mathematics**. An interest in the development of optimization-based methods and experience with MATLAB would also be appreciated.

Working environment

The École Centrale de Lyon (ECL) is a public scientific, cultural and professional institution. Member of the Ecoles Centrales group and the Écoles Nationales d'Ingénieurs network, ECL trains high-level generalist engineers, specialized engineers, masters students and doctoral candidates. The school hosts 2,500 engineering students and trainees, 300 master students and more than 250 doctoral students. It is characterized by recognized research supported by 6 research laboratories. ECL's research activities are directed to and for the business world through numerous industrial contracts.

The Ampère-lab is a joint research unit (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Lyon 1) of more than 150 researchers based in Lyon, France, working on the rational use of energy in systems in relation to their environment. The research carried out by the Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS) department includes the development of methods and tools for optimizing and controlling the dynamic behavior of systems in a wide range of application domains, in collaboration with other departments of the laboratory and other engineering laboratories. The combination of theoretical and applied dimensions of this research constitutes its great originality.

Over the last few years, the advisors have been working on the possibilities offered by Systems, Control and Signal approaches for the development of methods for the design/understanding of systems from different disciplines (electronics, electrical engineering, mechanics, biology, etc.). In particular, expertise has been developed in the design of systems obtained by interconnecting subsystems, for which the combination of the input-output approach with (convex [BTN01, BV04]) optimization tools seems to be particularly effective. Convincing results have already been obtained, ranging from upstream methodological contributions (e.g. [PKZS23, ACPKS23, LKD⁺17]) to their application to problems of strong practical interest (e.g. [PKS⁺21, KSCB16, GFS11]), and even to patent deposit (e.g. [PKZ⁺17, CGK10, CK13]).

Scientific background of the project

The ongoing integration of information technologies into engineering systems is radically changing the possibilities in a wide range of applications (energy production and distribution, telecommunications, transportation of goods and people, Industry 4.0, medicine, intelligent buildings, etc.), but at the cost of a **drastic increase in the complexity of the associated design problems**. In addition to having to meet **ever more stringent and even new requirements** (performance, safety, security, energy efficiency, cost, etc.), it must explicitly take into account the **complexity of the interconnection** (large size, degraded communication, live-machine interface, etc.) of **intrinsically complex and heterogeneous systems**. To meet these challenges, traditional design methods based on simulation and a trial-and-error approach often appear to be limited, and it has become necessary to develop adapted methods that enable efficient design.

System and Control theory and Signal Processing are natural candidates for the development of such design support methods. As representatives of cybernetics and information theory in engineering, these two disciplines provide the **complementary System and Signal views** needed to capture the full complexity of design problems. In addition to bridging the disciplines, their **abstract formalism** makes possible to **represent systems and their interconnections** while **taking into account the practical constraints of specifications**. Systems are represented as subsystems that interact with each other and with their environment through signals. Constraints are then imposed on these signals to characterize the subsystems and their interconnections, but also to translate the specifications.

In order to cope with the design complexity of modern systems, **the use of computing power seems to be essential**. Certain conflicting objectives then arise (computation time, optimality of the solution, design and implementation time of the algorithm used, etc.). For the engineering researcher, who has to develop and compare methods for different practical problems, a **good compromise** is given by the use of the class of convex optimization problems. In particular, this class is known to have good numerical solution properties, allowing **efficient solution**, with a computation time between a few seconds and a few minutes for a medium-sized problem with a few hundred optimization variables, and easy implementation, which has popularized its use in engineering sciences [BTN01,BV04]. The main difficulty in using convex optimization lies in the formulation of the problem in such a form, which often requires the development of reformulation or relaxation techniques.

Problem and Objective of the thesis

In this context, the goal of this thesis is to address the problem of efficient analysis and synthesis of interconnected heterogeneous systems. This problem is particularly relevant for large-scale systems (e.g., energy distribution networks, sensor networks, gene regulation networks, etc.).

A first strategy to tackle this problem is to **consider the global system** and use **classical methods** of analysis and synthesis. However, in the case of large systems, this type of approach will generally lead to very large optimization problems. A second strategy is to **describe the overall system as a collection of subsystems**, modeled by a characterization on the input and output signals of each subsystem. This type of approach has the advantage of greatly **reducing the complexity of the optimization problems**. In addition, for an application of estimation filter synthesis, this idea makes it possible to **reduce the order of the filters obtained**. This second strategy has recently led to significant results in the special case of homogeneous subsystems, i.e., those represented by the same model (see, for example, [ACPKS23,PKZS23,KSCB16]). However, in the more general case of heterogeneous subsystems, this approach tends to be *conservative*, i.e. it does not necessarily allow to find a solution even if one exists. The main suspected cause of this pessimism is the input-output characterization performed for each subsystem independently of the others, which **implicitly assumes** that the **subsystems** are **independent** and therefore that their models have no similarities.

The **objective** of this thesis is to overcome this problem by exploring an original idea : introducing **dependence between subsystem characterizations** to take into account similarities (e.g. algebraic or topological) in their modeling. The goal is to improve the **trade-off between algorithmic complexity and conservatism** by finding a balance between the two strategies described above. The interest and limitations of this idea will be illustrated in particular by a signal estimation filter synthesis application.

The main challenge will be to formalize the type of dependency between subsystem characterizations that can be included in the analysis and synthesis (estimation filter) methods, while preserving the convex character of the optimization problems to be solved. An alternative path to consider will be the use of convex relaxations.

As the expected contributions are mainly methodological, the results will be valorized mainly through presentations at international conferences and publications in leading journals in the field of Control and System theory.

Recruitment process

Interested candidates, or those wishing more information, are warmly invited to send an e-mail containing a CV + a short message of presentation and motivation to the management team (see e-mail addresses at the beginning of this document).

The recruitment process consists of three stages :

1. **Application until 05/05/2024. Oral interview** by the advisors team and selection of the candidate.
2. Oral interview by the EEA Doctoral School Board in late May/early June.
3. Final result : first half of June.

Income and Benefits

Salary of 2100€ (gross) per month.

Career prospects after a PhD

The future PhD will develop a set of skills that can be applied in a wide range of professional environments. In particular, the following careers are targeted : researcher, PhD engineer, R&D engineer, in the public or private sector.

Références

- [ACPKS23] J. Ayala-Cuevas, A. Perodou, A. Korniienko, and G. Scorletti. A frequency-domain Integral Quadratic Constraint approach to the analysis of Harmonically Time-Varying Systems. *Automatica*, 152 :110956, 2023.
- [BTN01] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. *Lectures on Modern Convex Optimization : Analysis, Algorithms, and Engineering Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.
- [BV04] S. P. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [CGK10] E. Colinet, D. Galayko, and A. Korniienko. Device for generating clock signals for asymmetric comparison of phase, 2010. United States Patent WO/2011/051407 (PCT/EP2010/066405).
- [CK13] E. Colinet and A. Korniienko. Device and method for compensating a signal propagation delay, 2013. US Patent 8,373,476.
- [GFS11] A. Goelzer, V. Fromion, and G. Scorletti. Cell Design in Bacteria as a Convex Optimization Problem. *Automatica*, 47(6) :1210–1218, 2011.
- [KSCB16] A. Korniienko, G. Scorletti, E. Colinet, and E. Blanco. Performance Control for Interconnection of Identical Systems : Application to PLL network design. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 26 :3–27, 01 2016.
- [LKD⁺17] K. Laib, A. Korniienko, M. Dinh, G. Scorletti, and F. Morel. Hierarchical Robust Performance Analysis of Uncertain Large Scale Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(7) :2075–2090, 2017.
- [PKS⁺21] A. Perodou, A. Korniienko, G. Scorletti, M. Zarudniev, J. B. David, and I. O’Connor. Frequency Design of Lossless Passive Electronic Filters : A State-Space Formulation of the Direct Synthesis Approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers*, 68(1) :161–174, 2021.
- [PKZ⁺17] M. Pelissier, A. Korniienko, M. Zarudniev, G. Scorletti, O. Mokrenko, E. Blanco, P. Villard, and G. Billiot. Phase-locked loop with multiple degrees of freedom and its design and fabrication method, March 2017. US Patent 9,602,114.
- [PKZS23] A. Perodou, A. Korniienko, M. Zarudniev, and G. Scorletti. Frequency Synthesis of Interconnected Homogeneous LTI Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023.