

**CENTRALE
LYON**



Offre de thèse de doctorat en Automatique - Traitement du Signal

ECOLE CENTRALE DE LYON - LABORATOIRE AMPÈRE
TH. SIRO - SIGNAL, IDENTIFICATION, ROBUSTESSE,
OPTIMISATION

Informations Générales

Offre Doctorat en Automatique et/ou Traitement du Signal sur un des deux sujets suivants :

- Vers l'analyse et la synthèse efficaces des Systèmes Hétérogènes Interconnectés : application à l'estimation de signaux (SystHel)
- Analyse et synthèse de Détecteurs d'Anomalies sous contrainte de temps-Critique (DAC)

Durée : 3 ans avec début entre Septembre et Novembre 2026.

Lieu : Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère, Ecully (Rhône, France)

Mots-clés généraux Automatique - Traitement du Signal - Approche Signaux et Systèmes - Systèmes dynamiques - Méthodologie - Systèmes interconnectés - Optimisation convexe - Robustesse - Applications - Sciences de l'Ingénieur·e

Modalités : Les candidat·es intéressé·es, ou souhaitant plus d'information, sont vivement invité·es à se manifester en envoyant un mail contenant un CV et un court message de présentation et de motivation à l'équipe d'encadrement :

Arthur PERODOU, MCF, Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Anton KORNIENKO, PU, Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Gérard SCORLETTI, PU, Ecole Centrale de Lyon, Lab. Ampère

Contact : {arthur.perodou ; anton.korniienko ; gerard.scorletti}@ec-lyon.fr

Contexte de travail

L'Ecole 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, tous UMR CNRS. 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 dans l'équipe 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 compréhension et de conception des systèmes relevant de différentes disciplines scientifiques (Electronique, Energie Electrique, Mécanique, Biologie, etc.) en collaboration avec des spécialistes de ces disciplines. 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 dite entrée-sortie, où un système est caractérisé par des contraintes sur les signaux d'entrée et de 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]).

Plus récemment, l'équipe s'est mise à explorer la thématique de la sûreté et la sécurité des systèmes cyber-physiques (ex : [PCZ21b, PCZ21a, EMSZ20]) : voir sujet 2 (DAC).

Contexte scientifique

L'intégration en cours des technologies de l'information dans les systèmes d'ingénierie modifie radicalement les possibilités dans un large spectre d'applications (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 associés**. 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 sciences de l'ingénieur·e**, 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'exploitation 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, ce qui a popularisé son utilisation dans les sciences de l'ingénieur·e [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 Objectifs

L'offre propose de travailler sur l'un des deux sujets décrits ci-après.

Sujet 1 (SystHeI) - Vers l'analyse et la synthèse efficaces des Systèmes Hétérogènes Interconnectés : application à l'estimation de signaux

Mots-clés : Filtres d'estimation - Synthèse d'interconnexion - Sous-systèmes hétérogènes

Dans ce sujet, il est proposé de s'attaquer à la **problématique de l'analyse et la synthèse efficaces de systèmes hétérogènes interconnectés**, et plus particulièrement dans un contexte d'estimation de signaux par filtrage (Figure 1). 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 dimension**. 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 filtres 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 repré-

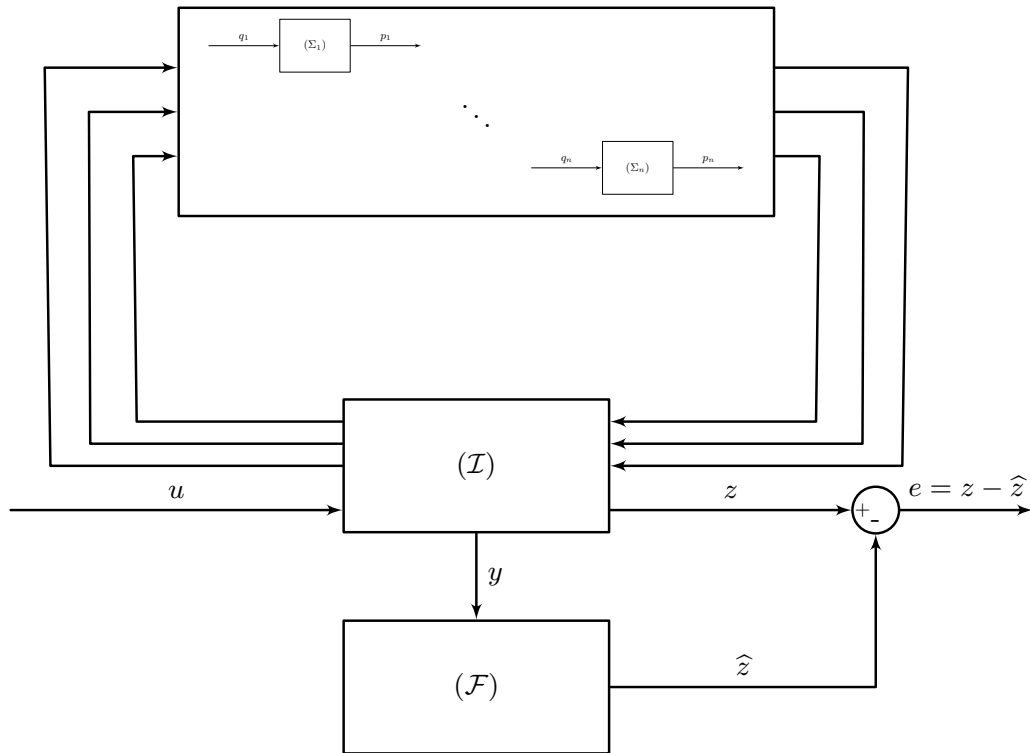


FIGURE 1 – Problème d'estimation de signaux z par filtrage $(\mathcal{F})$ pour des systèmes définis comme l'interconnection $(\mathcal{I})$ de systèmes hétérogènes $(\Sigma_1), \dots, (\Sigma_n)$.

sentés 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 leurs modèles ne partagent aucune similitude.

L'**objectif** de ce doctorat 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 filtres 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.

Sujet 2 (DAC) - Analyse et synthèse de Détecteurs d'Anomalies sous contrainte de temps-Critique

Mots-clés : Systèmes cyber-physiques - Sécurité - Détecteur d'anomalies (attaques, défauts)

La problématique de la sécurité des systèmes consiste à pouvoir **assurer la satisfaction des spécifications d'un cahier des charges en présence de comportements malveillants ou d'événements imprévus**. Historiquement divisée en la lutte contre des attaques physiques et la protection des technologies de l'information, l'augmentation significative de cyber-attaques

contre des systèmes commandés (infrastructures industrielles, réseaux électriques, drones, ...) ces deux dernières décennies [DPF⁺19, SRE⁺19] et la limitation des approches classiques a **rendu nécessaire de développer une approche systémique de la sécurité des systèmes** [SAJ15], prenant notamment en compte l'interaction entre les mondes cyber et physique (Fig. 2). D'un côté, les méthodes traditionnelles de sécurité des technologies de l'information se concentrent principalement sur la protection de l'information, et ne prennent pas directement en compte les répercussions physiques possibles de cyber-attaques. De l'autre, les approches classiques d'Automatique et de Traitement du Signal permettent de traiter la tolérance à des perturbations indépendantes, mais ne prennent pas en compte de possibles attaques d'acteurs rationnels malveillants. Ainsi, des approches ont été développées au cours de la dernière décennie pour la prévention, la détection et l'atténuation des attaques sur les systèmes [CST19, DPF⁺19].

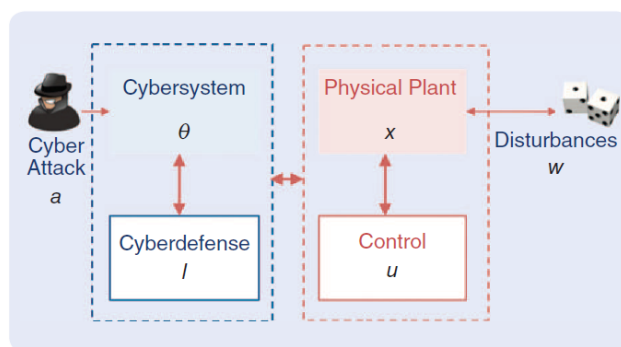


FIGURE 2 – Nécessité de considérer l'interconnexion entre mondes cyber et physique [ZB15]

Un enjeu important est de **trouver un compromis approprié entre le niveau de sécurité souhaité et la satisfaction d'un cahier des charges fonctionnel**. Cela est notamment dû à la difficulté d'évaluer le risque, et particulièrement la probabilité d'occurrence, d'une attaque du fait de l'hétérogénéité des attaquants, aussi bien en termes d'objectifs que de ressources [TSSJ15]. L'ambition de ce sujet est de s'attaquer à la **problématique de l'analyse et la synthèse efficaces de détecteurs d'anomalies** (attaques, défauts) **sous contrainte de temps-critique**. Le **temps-critique** est l'horizon temporel maximal pour lequel un système est considéré comme étant dans un état sûr après l'apparition d'une anomalie, c'est-à-dire que le système n'est pas dans un état critique et est encore capable de revenir à un mode normal. Cette **métrique de sécurité** introduite dans [PCZ21a] apparaît comme pertinente à chaque étape du processus de **gestion de risque (analyse, prévention, détection, atténuation)**. La motivation sous-jacente est qu'une augmentation du temps-critique laisse davantage de temps aux mécanismes de défense, y compris aux opérateurs humains, pour détecter et atténuer les anomalies.

La **performance des détecteurs d'anomalies** est traditionnellement évaluée selon trois critères : le **taux de détection**, le **taux de fausses alarmes** et le **retard à la détection**. Lors de la **synthèse** d'un détecteur, **seuls les deux premiers critères** sont considérés. L'estimation du **retard à la détection**, et la vérification que le système ne rentre pas dans un état critique avant la détection (c'est-à-dire que le retard à la détection soit inférieur au temps-critique), est alors **estimé dans une phase post-synthèse** à l'aide de simulations.

Le **premier objectif** est de **développer une méthode d'analyse algorithmiquement efficace permettant de garantir formellement si le retard à la détection d'un filtre dans le pire-cas est inférieur au temps-critique**. Pour cela, les recherches pourront s'appuyer sur des travaux existants [PCZ21b, EMSZ20, BTMS17] sur le calcul du temps-critique

et de la technique dite de la simulation robuste, et les étendre à des systèmes d'intérêt plus pratique (systèmes linéaires incertains). Le **deuxième objectif** est de proposer une méthode permettant de prendre en compte la contrainte du temps-critique directement lors de la **synthèse du filtre de détection**. Un enjeu important pour ce deuxième objectif est l'obtention d'une méthode algorithmiquement efficace, ce qui pourra nécessiter la simplification du problème (relaxation de contraintes, reformulation ou approximation pertinente du problème, etc.). Ces deux premiers objectifs se placent dans le contexte d'anomalies fulgurantes, ayant un fort impact sur le système en un temps limité. Le **troisième objectif** est alors de synthétiser un détecteur d'anomalies de façon à **garantir un temps-critique minimum pour les attaques dites furtives**, conçues pour ne pas être détectées par le filtre.

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.
- [BTMS17] H. Ben-Talha, P. Massioni, and G. Scorletti. Robust Simulation of Continuous-Time Systems with Rational Dynamics. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27(16) :3097–3108, 2017.
- [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.
- [CST19] M. S. Chong, H. Sandberg, and A. M. H. Teixeira. A Tutorial Introduction to Security and Privacy for Cyber-Physical Systems. In *2019 18th European Control Conference (ECC)*, pages 968–978, 2019.
- [DPF⁺19] S. M. Dibaji, M. Pirani, D. B. Flamholz, A. M. Annaswamy, K. H. Johansson, and A. Chakraborty. A Systems and Control Perspective of CPS security. *Annual Reviews in Control*, 47 :394–411, 2019.
- [EMSZ20] C. Escudero, P. Massioni, G. Scorletti, and E. Zamaï. Security of Control Systems : Prevention of Aging Attacks by means of Convex Robust Simulation Forecasts. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2) :4452–4459, 2020.
- [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.

- [PCZ21a] A. Perodou, C. Combastel, and A. Zolghadri. Critical-Time Analysis of Cyber-Physical Systems subject to Actuator Attacks and Faults. In *2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 4188–4193, Dec. 2021.
- [PCZ21b] A. Perodou, C. Combastel, and A. Zolghadri. Towards Anomaly-Tolerant Systems by Dissipation Block Synthesis. In *2021 5th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, pages 19–24, Sept. 2021.
- [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.
- [SAJ15] H. Sandberg, S. Amin, and K. H. Johansson. Cyberphysical Security in Networked Control Systems : An Introduction to the Issue. *IEEE Control Systems Magazine*, 35(1) :20–23, 2015.
- [SRE⁺19] H. S. Sánchez, D. Rotondo, T. Escobet, V. Puig, and J. Quevedo. Bibliographical Review on Cyber Attacks from a Control Oriented Perspective. *Annual Reviews in Control*, 48 :103–128, 2019.
- [TSSJ15] A. Teixeira, K. C. Sou, H. Sandberg, and K. H. Johansson. Secure Control Systems : A Quantitative Risk Management Approach. *IEEE Control Systems Magazine*, 35(1) :24–45, 2015.
- [ZB15] Q. Zhu and T. Basar. Game-Theoretic Methods for Robustness, Security, and Resilience of Cyberphysical Control Systems : Games-in-Games Principle for Optimal Cross-Layer Resilient Control Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 35(1) :46–65, 2015.