



institut  
universitaire  
de France



IAEM



## PhD thesis proposal

### Development of harmonic control algorithms for interconnected systems: Application to electrical actuation chains in aeronautics.

**Doctoral school:** IAEM-Lorraine

#### Supervisors:

Jamal Daafouz ([Jamal.Daafouz@univ-lorraine.fr](mailto:Jamal.Daafouz@univ-lorraine.fr))

Pierre Riedinger ([Pierre.Riedinger@univ-lorraine.fr](mailto:Pierre.Riedinger@univ-lorraine.fr))

**Location:** CRAN, 2 avenue de la forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre, France,  
<https://www.cran.univ-lorraine.fr/>

**Dates:** 3 years, starting at fall 2025.

**Funding:** « Lorraine Université d'Excellence » doctoral contract.

**Keywords:** Distributed harmonic control, Interconnected systems, Embedded electrical networks.

#### Context:

Current trends in the design of technical, environmental, and social systems are characterized by strong connectivity, increasing size, intrinsic heterogeneity, high autonomy, and a growing awareness of resource sharing. These trends are visible in various sectors, including the transport and energy industries. Resource constraints necessitate information exchange to understand global behavior and, consequently, adjust individual behavior. To achieve desired objectives, this local regulation must be coupled with global cooperation and interactions. Additionally, these systems are uncertain, characterized by interactions between dynamics of different natures and communication topologies that evolve over time. Such architectures are extremely difficult to control and present major scientific and technological challenges, at the core of automation and control theory. Understanding how to model and control these systems is of significant scientific and economic interest [1, 2].

In this context, many technological or biological systems can be viewed as networks of interacting periodic processes. Energy management systems are typical examples, but similar processes are also found in neuroscience and biology, where multiple levels are governed by interacting periodic processes [3, 4]. Mastering harmonic control, either individually or considering interactions, is an issue of both practical and theoretical interest. Its relevance is evident in applications such as power grids or neuroscience, where specific frequency attenuation is required [5, 6]. The objective of this thesis is to develop harmonic control algorithms for interconnected systems. Harmonic control aims to reduce harmonic distortions while ensuring stability and performance. The main application concerns electrical actuation chains, a crucial technological component in embedded electrical networks in aeronautics, where the demand for electrical energy is constantly increasing. This phenomenon of aircraft electrification is expected to grow for both ecological and economic reasons, with the goal of achieving a "fully electric" aircraft in the future.

#### Research program:

The research program will build upon the harmonic control approach we previously developed for isolated periodic systems [7, 8]. As detailed in [9, 10], this methodology has been experimentally validated through collaboration with SAFRAN, a global leader in embedded power systems and energy management for the aerospace industry. The main challenge is to design new methodologies considering the interconnections to ensure the stability and closed-loop performance of the overall

interconnected system. From a theoretical point of view, the problem can be formulated as the stabilization of interconnected periodic dynamic systems. Our objective is to address two key open problems related to harmonic control in interconnected systems:

- **Distributed Stability Analysis:** The challenge here is to analyze the stability of interconnected periodic systems using only local model information, without relying on a centralized decision-maker. First, assuming harmonic control is designed for each individual system, the harmonic effects from other subsystems will be treated as disturbances. The goal is to study how different disturbances propagate and impact the steady-state behavior of the overall system. Second, to ensure stability of the interconnected system with only local data, we will adapt distributed stability tests to the harmonic setting, leveraging vector Lyapunov functions or Lyapunov inequalities under structural constraints.
- **Distributed Optimal Control:** Many interconnected periodic systems pursue shared global objectives related to overall performance, subject to local constraints and harmonic disturbances [11]. Our aim is to extend the approach from [5, 6] by explicitly considering the nature and dynamics of the interconnections. The primary objective is to derive feedback control laws that are optimal with respect to a quadratic cost functional within the framework of interconnected periodic dynamic systems. We will examine scenarios where nodes have information about the structural data of the entire network but take local actions, as well as situations where only local information is available. The expected outcome is a novel decentralized and distributed harmonic control methodology for interconnected systems, including optimal consensus algorithms from a harmonic modeling perspective [12].

The proposed methodologies will be evaluated on use cases from embedded electrical networks.

**Ideal profile:** We are looking for highly motivated and talented students who are interested in tackling challenging research problems. The research work envisioned for this thesis is mainly theoretical in nature and requires strong foundations in control theory or applied mathematics. Graduates applying for this position should have the following:

- M.Sc. or equivalent in control theory, applied mathematics Mathematics or Electrical Engineering.
- Sufficient mathematical maturity and strong interest in applied mathematics and optimization. Prior research experience and publications are a plus.
- Excellent academic results.

## References:

- [1] A. M. Annaswamy, K. H. Johansson, and G. J. Pappas, "Control for Societal-scale Challenges: Road Map 2030", IEEE Control Systems Society Publication, 2023, <https://ieeecss.org/control-societal-scale-challenges-roadmap-2030>
- [2] G. Baggio, D.S. Bassett, F. Pasqualetti. "Data-driven control of complex networks." *Nature*, 12(1), 1-13, 2021.
- [3] M. Breakspear. "Dynamic models of large-scale brain activity." *Nature neuroscience*, 20(3):340-352, 2017.
- [4] S. Strogatz. "Exploring complex networks." *Nature*, 410, 268–276, 2001.
- [5] Sajadi, A., Kenyon, R.W. & Hodge, B.M. Synchronization in electric power networks with inherent heterogeneity up to 100% inverter-based renewable generation. *Nat Commun* **13**, 2490 (2022).
- [6] J. E. Fleming, J. Orłowski, M. M. Lowery, A. Chaillet. "Self-Tuning Deep Brain Stimulation Controller for Suppression of Beta Oscillations: Analytical Derivation and Numerical Validation." *Frontiers in Neuroscience*, Frontiers, 2020
- [7] N. Blin, P. Riedinger, J. Daafouz, L. Grimaud, P. Feyel. "Necessary and Sufficient Conditions for Harmonic Control in Continuous Time." Full paper in *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(8):4013-4028, 2022.
- [8] P. Riedinger, J. Daafouz. "Solving Infinite-Dimensional Harmonic Lyapunov and Riccati equations." To appear as a Full paper in *IEEE Transactions on Automatic Control*. doi: 10.1109/TAC.2022.3229943.
- [9] M. Grosso, P. Riedinger, J. Daafouz, S. Pierfederici, H. Janati-Idrissi and B. Lapôtre. Harmonic control of three-phase AC/DC converter, conditionally accepted at IEEE TCST, arXiv2307.06680, 2023 <https://arxiv.org/abs/2307.06680>
- [10] M. Grosso, P. Riedinger, J. Daafouz, S. Pierfederici, H. Janati-Idrissi and B. Lapôtre. Commande de convertisseur polyphasé par technique harmonique interpolée. Brevet B-028898. 2024.
- [11] S. Trip, M. Cucuzzella, X. Cheng and J. Scherpen, "Distributed Averaging Control for Voltage Regulation and Current Sharing in DC Microgrids," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 174-179, Jan. 2019.
- [12] F. Bullo, *Lectures on Network Systems*, Kindle Direct Publishing, 2024.



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE



institut  
universitaire  
de France



IAEM



## Proposition de thèse de doctorat

### Développement d'algorithmes de contrôle harmonique pour les systèmes interconnectés : Application aux chaînes d'actionnement électrique en aéronautique.

**Ecole doctorale :** IAEM-Lorraine

**Encadrants :**

Jamal Daafouz ([Jamal.Daafouz@univ-lorraine.fr](mailto:Jamal.Daafouz@univ-lorraine.fr))

Pierre Riedinger ([Pierre.Riedinger@univ-lorraine.fr](mailto:Pierre.Riedinger@univ-lorraine.fr))

**Lieu :** CRAN, 2 avenue de la forêt de Haye, 54500 Vandoeuvre, France.

<https://www.cran.univ-lorraine.fr/>

**Dates :** 3 ans, début à la rentrée 2025.

**Financement :** contrat doctoral « Lorraine Université d'Excellence ».

**Mots-clés :** Contrôle harmonique distribué, systèmes interconnectés, réseaux électriques intégrés.

**Contexte :**

Les tendances actuelles dans la conception des systèmes techniques, environnementaux et sociaux se caractérisent par une forte connectivité, une taille croissante, une hétérogénéité intrinsèque, une grande autonomie et une prise de conscience accrue du partage des ressources. Ces tendances sont visibles dans divers secteurs, notamment les industries du transport et de l'énergie. La contrainte sur les ressources impose un échange d'informations pour comprendre le comportement global et, par conséquent, ajuster le comportement individuel. Pour atteindre les objectifs souhaités, cette régulation locale doit être accompagnée d'une coopération et d'interactions à l'échelle globale. En outre, ces systèmes sont incertains, marqués par l'interaction de dynamiques de natures différentes et des topologies de communication en évolution. De telles architectures sont extrêmement complexes à contrôler, soulevant des défis scientifiques et technologiques majeurs, au cœur de l'automatique et de la théorie du contrôle. Comprendre comment modéliser et contrôler ces systèmes est d'une importance scientifique et économique majeure [1, 2].

Dans ce contexte, de nombreux systèmes technologiques ou biologiques peuvent être perçus comme des réseaux de processus périodiques en interaction. Les systèmes de gestion de l'énergie en sont des exemples typiques, mais des processus similaires se retrouvent également en neurosciences et en biologie, où plusieurs niveaux sont gouvernés par des processus périodiques en interaction [3, 4]. Maîtriser le contrôle des harmoniques, que ce soit au niveau individuel ou en tenant compte des interactions, est un enjeu à la fois théorique et pratique. Son importance est évidente dans des applications telles que les réseaux électriques ou les neurosciences, par exemple pour atténuer certaines fréquences spécifiques [5, 6]. L'objectif de cette thèse est de développer des algorithmes de contrôle harmonique pour les systèmes dynamiques interconnectés. Le contrôle harmonique vise à réduire les distorsions tout en garantissant la stabilité et les performances. L'application principale concerne les chaînes d'actionnement électrique, un élément technologique crucial dans les réseaux électriques embarqués en aéronautique, où la demande en énergie électrique ne cesse de croître. Ce phénomène d'électrification des avions continue de s'accroître pour des raisons écologiques et économiques, dans la perspective de réaliser un avion "tout électrique" à l'avenir.

**Programme de recherche :**

Le programme de recherche est fondé sur l'approche harmonique que nous avons développée pour des systèmes périodiques isolés [7, 8]. Cette méthodologie a été validée expérimentalement en collaboration avec SAFRAN, un leader mondial des systèmes électriques embarqués et de la gestion

de l'énergie pour l'industrie aéronautique, comme mentionné dans [9, 10]. Le principal défi est de concevoir de nouvelles méthodologies tenant compte des interconnexions afin de garantir la stabilité et les performances en boucle fermée de l'ensemble du système interconnecté. D'un point de vue théorique, le problème peut être formulé comme la stabilisation distribuée de systèmes dynamiques périodiques interconnectés. Notre objectif est de traiter deux problèmes ouverts clés liés au contrôle harmonique dans les systèmes interconnectés :

- **Analyse de stabilité distribuée** : Le défi ici est d'analyser la stabilité des systèmes périodiques interconnectés en utilisant uniquement les informations locales des modèles, sans recourir à un contrôle centralisé. Tout d'abord, en supposant que le contrôle harmonique soit conçu pour chaque système individuel, les effets harmoniques des autres sous-systèmes seront traités comme des perturbations. L'objectif est d'étudier comment ces différentes perturbations se propagent et affectent le comportement en régime permanent de l'ensemble du système. Ensuite, pour assurer la stabilité du système interconnecté avec uniquement des données locales, nous adapterons les tests de stabilité distribués au cadre harmonique en nous appuyant sur des fonctions de Lyapunov vectorielles ou des inégalités de Lyapunov soumises à des contraintes structurelles.
- **Contrôle optimal distribué** : De nombreux systèmes périodiques interconnectés doivent répondre à des objectifs globaux communs liés à la performance globale, sous des contraintes locales et de perturbations harmoniques [11]. Nous souhaitons étendre l'approche harmonique, exposée dans [5, 6], afin de prendre en compte la nature et la dynamique des interconnexions. L'objectif principal est de développer des lois de commande optimales avec coût quadratique dans le cadre des systèmes dynamiques périodiques interconnectés. On examinera des scénarios où les nœuds disposent d'informations sur les données structurelles de l'ensemble du réseau mais prennent des actions locales, ainsi que des situations où seules des informations locales sur le réseau sont disponibles. Le résultat attendu est une nouvelle méthodologie de contrôle harmonique décentralisée pour les systèmes interconnectés, incluant des algorithmes de consensus optimaux dans un cadre harmonique [12].

Les méthodologies seront évaluées sur des cas d'usage issus des réseaux électriques embarqués.

**Profil idéal** : Nous recherchons des étudiants motivés et talentueux, intéressés par la résolution de problèmes de recherche complexes. Le travail de recherche prévu pour cette thèse est principalement théorique et nécessite de solides bases en théorie du contrôle ou en mathématiques appliquées. Les compétences recherchées sont les suivantes :

- Master ou équivalent en théorie du contrôle, mathématiques appliquées ou génie électrique.
- Une bonne maturité mathématique et un intérêt marqué pour les mathématiques appliquées et l'optimisation. Une expérience de recherche antérieure et des publications sont un atout.
- D'excellents résultats académiques.

## Références:

- [1] A. M. Annaswamy, K. H. Johansson, and G. J. Pappas, "Control for Societal-scale Challenges: Road Map 2030", IEEE Control Systems Society Publication, 2023, <https://ieeecs.org/control-societal-scale-challenges-roadmap-2030>
- [2] G. Baggio, D.S. Bassett, F. Pasqualetti. "Data-driven control of complex networks." *Nature*, 12(1), 1-13, 2021.
- [3] M. Breakspear. "Dynamic models of large-scale brain activity." *Nature neuroscience*, 20(3):340-352, 2017.
- [4] S. Strogatz. "Exploring complex networks." *Nature*, 410, 268–276, 2001.
- [5] Sajadi, A., Kenyon, R.W. & Hodge, B.M. Synchronization in electric power networks with inherent heterogeneity up to 100% inverter-based renewable generation. *Nat Commun* **13**, 2490 (2022).
- [6] J. E. Fleming, J. Orłowski, M. M. Lowery, A. Chaillet. "Self-Tuning Deep Brain Stimulation Controller for Suppression of Beta Oscillations: Analytical Derivation and Numerical Validation." *Frontiers in Neuroscience*, Frontiers, 2020
- [7] N. Blin, P. Riedinger, J. Daafouz, L. Grimaud, P. Feyel. "Necessary and Sufficient Conditions for Harmonic Control in Continuous Time." Full paper in *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(8):4013-4028, 2022.
- [8] P. Riedinger, J. Daafouz. "Solving Infinite-Dimensional Harmonic Lyapunov and Riccati equations." To appear as a Full paper in *IEEE Transactions on Automatic Control*. doi: 10.1109/TAC.2022.3229943.
- [9] M. Grosso, P. Riedinger, J. Daafouz, S. Pierfederici, H. Janati-Idrissi and B. Lapôtre. Harmonic control of three-phase AC/DC converter, conditionally accepted at IEEE TCST, arXiv2307.06680, 2023 <https://arxiv.org/abs/2307.06680>
- [10] M. Grosso, P. Riedinger, J. Daafouz, S. Pierfederici, H. Janati-Idrissi and B. Lapôtre. Commande de convertisseur polyphasé par technique harmonique interpolée. Brevet B-028898. 2024.
- [11] S. Trip, M. Cucuzzella, X. Cheng and J. Scherpen, "Distributed Averaging Control for Voltage Regulation and Current Sharing in DC Microgrids," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 174-179, Jan. 2019.
- [12] F. Bullo, *Lectures on Network Systems*, Kindle Direct Publishing, 2024.