



**EEA**  
ÉLECTRONIQUE  
ÉLECTROTECHNIQUE  
ET AUTOMATIQUE  
UNIVERSITÉ DE LYON



## Sujet de thèse

### École doctorale EEA de Lyon

<b>Etablissement d'inscription</b> : Université Claude Bernard Lyon 1
<b>École doctorale</b> : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
<b>Intitulé du doctorat</b> : Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser
<b>Sujet de la thèse</b> : Convergence Énergie Information Pour Systèmes Distribués Autonomes
<b>Unité de recherche</b> : Laboratoire Ampère UNRM CNRS 5005, dirigée par Christian Vollaire
<b>Directeur/trice de thèse</b> : Mr Miyeville Fabien
<b>Co-directeur/trice de thèse</b> : Julien Huillery, Anton Korniienko
<b>Co-directeur/trice de thèse en entreprise</b> (le cas échéant) :

**Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels<sup>1</sup> : AUCUNE**

**Domaine et contexte scientifiques :**

La notion d'intelligence ubiquitaire et d'environnement ubiquitaire énoncée par Mark Weiser a vu son incarnation physique se développer avec l'avènement d'abord des réseaux de capteurs sans fil puis de l'Internet des Objets. Cette notion d'environnement ubiquitaire qui consiste à mettre en œuvre une interpénétration totale entre intelligence embarquée informatique et l'environnement physique a vu ses différents verrous technologiques se résoudre sur la dernière décennie : l'évolution des systèmes électroniques a en effet levé les limitations sur la capacité de calcul embarquée et sur les capacités de communication. L'intelligence artificielle via le machine learning est désormais possible sur des systèmes électroniques à très faible encombrement physique. Néanmoins, demeure l'enjeu majeur de l'autonomie, enjeu qui est actuellement visé par deux approches : réseaux de capteurs autonomes à récupération d'énergie d'une part et edge computing d'autre part.

Cette contrainte élevée repose de manière plus exacerbée que jamais la question du rapport entre l'énergie et l'information. Au-delà de l'évaluation classique du coût énergétique de l'information (sa collecte, son traitement numérique et sa transmission), les questions fondamentales à se poser sont plus globales et nécessitent de considérer le signal physique d'une manière unifiée : source d'information, source d'énergie et moyen possible de communication. Cette thèse vise à établir un cadre conceptuel et formel de la vision unifiée énergie-information et la mettre en application au travers d'un banc expérimental 2D de contrôle actif de vibration par réseau d'IoT distribué.

**Mots-clefs :** réseaux de capteurs autonomes; compromis énergie-information; contrôle de vibration; intelligence distribuée; efficacité énergétique;

**Objectifs de la thèse :**

L'objectif de la thèse est de formaliser la relation entre énergie et information dans des systèmes embarqués électroniques autonomes. Ce formalisme sera validé sur un exemple d'application concret de contrôle actif de vibrations à base d'intelligence distribuée.

Dans un paradigme d'environnement ubiquitaire, tout signal physique extrait est en effet :

- i. source de l'information collectée,
- ii. source de l'énergie transformée pour alimenter le système électronique
- iii. support de l'action mise en œuvre pour modifier l'environnement matériel

---

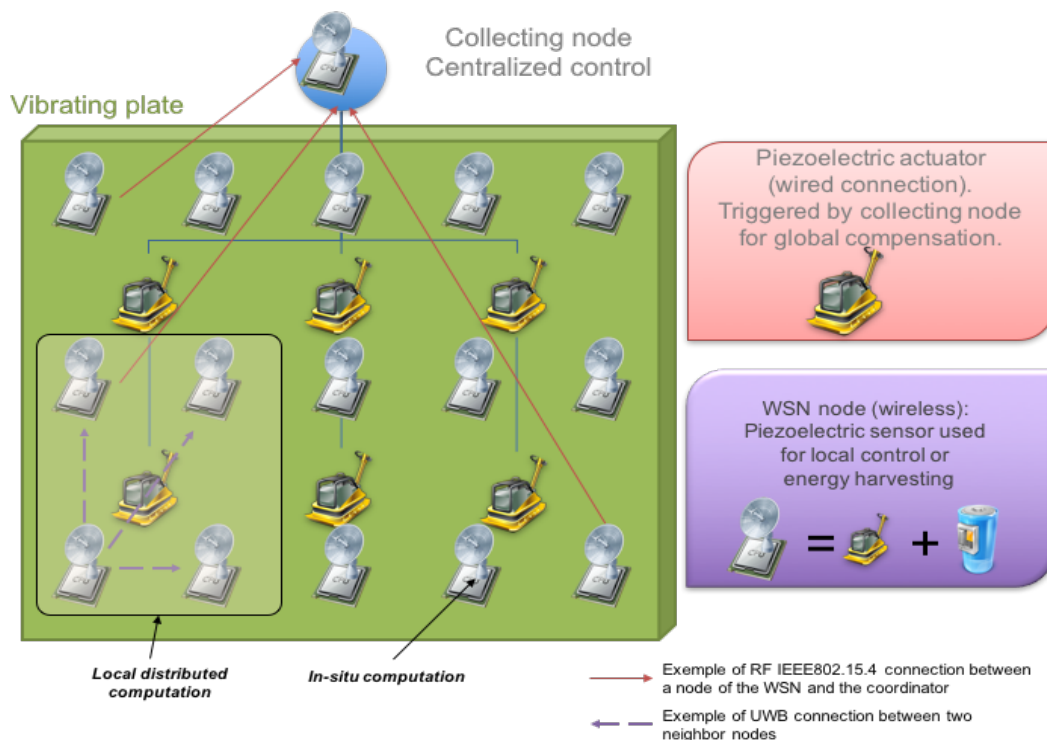
<sup>1</sup> Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

Pour toute conception optimale de systèmes électroniques embarqués dans cet environnement ubiquitaire, cette triple exploitation du signal physique, à la fois sur sa dimensionnement énergie mais également information nécessite qu'un formalisme soit établi et que les relations entre énergie et information soient explorées. En effet, toute exploitation du signal sur sa dimension énergie se fait au détriment de l'information qu'il véhicule et vice-versa.

De manière plus large, les travaux développés rejoindront les enjeux globaux d'efficacité énergétique de systèmes électroniques autonomes (ou frugaux) d'intelligence distribuée.

La représentation concrète de cette approche systémique sera mise en oeuvre pour :

- l'évaluation du compromis entre énergie et information, aux différentes échelles du système distribué, à savoir de l'individu unitaire au réseau global en passant par le voisinage proche (échelles in-situ, locale, globale);
- l'établissement d'une méthode de conception, dimensionnement et de gestion des modes de fonctionnement dynamiques pour des systèmes communicants distribués (réseaux de capteurs/actionneurs);
- l'optimisation hiérarchique multi-échelle du compromis énergie-information d'un réseau distribué (du nœud local au réseau global).



### **Verrous scientifiques :**

Le premier verrou scientifique repose sur la définition des critères qui permettront d'évaluer le compromis énergie-information aux différentes échelles du système distribué (échelles locale, semi-globale, globale). Aucun formalisme unifié n'existe à ce jour pour définir ce compromis. L'ambition de ce sujet de thèse est de faire une proposition d'un tel formalisme dans le cadre applicatif d'un réseau de capteurs/actuateurs dédié au contrôle de vibrations.

Le second verrou inhérent aux systèmes distribués réside dans la prise en compte des modifications du compromis énergie-information lors des passages d'échelle top-down et bottom-up.

### **Contributions originales attendues :**

Il est attendu que ces travaux de thèse mènent à la proposition d'un formalisme permettant d'évaluer qualitativement et quantitativement le compromis énergie-information dans un réseau de capteurs-actionneurs dans le cadre applicatif du contrôle de vibrations.

Dans ce cadre applicatif, des contributions originales sont également attendues sur la validation expérimentale d'un système de contrôle actif par réseau de capteurs-actionneurs autonomes.

### **Programme de recherche et démarche scientifique proposée :**

A - Un premier axe de travail visera à établir le compromis énergie-information au niveau local, c'est-à-dire en considérant un unique nœud développé au laboratoire Ampère . Celui-ci est doté de quatre fonctionnalités :

- récupération d'énergie (conversion mécano-électrique)
- stockage d'énergie (batterie ou capacité de stockage)
- traitement de l'information (microcontrôleur)
- actionnement (conversion électromécanique)

Ce capteur/actionneur étant autonome, les fonctions de récupération d'énergie, de mesure d'information et d'actionnement ne peuvent être réalisées simultanément.

Dans un premier temps, il s'agira de mettre en balance la quantité d'énergie produite par les vibrations de la plaque et emmagasinable dans l'élément de stockage par rapport à la

quantité d'énergie nécessaire (i) au calcul de la loi de commande, et (ii) à l'actionnement de la contre-réaction.

Dans un second temps, il s'agira d'évaluer la quantité d'information à mesurer sur la plaque en vibration permettant d'assurer un contrôle actif satisfaisant.

Enfin, dans un troisième temps, le compromis énergie-information sera étudié en évaluant les performances du contrôle actif de vibration en fonction de la répartition du temps alloué (i) à la récupération et au stockage d'énergie, (ii) à la mesure de l'information et au calcul de la loi de commande, et (iii) à l'actionnement.

*Cet axe mettra en oeuvre des compétences liées aux systèmes embarqués communicant et à la récupération d'énergie.*

B - En parallèle de ce premier axe de travail, un travail de fond sera mené sur les méthodes et outils les plus adaptés à l'étude et la formalisation de ce compromis énergie-information. Les systèmes visés étant multiphysique, les outils conventionnels disciplinaires ne sauront suffire : les premières pistes de travail à explorer seront la théorie des bondgraphs d'une part qui met l'accent sur la dimension énergétique des systèmes indépendamment de leur nature et la théorie des systèmes multi-agents d'autre part qui met l'accent sur la dynamique de réseau pouvant émerger des connexions et échanges d'information au travers d'un réseau.

*Cette partie du travail sera plutôt axée sur un travail théorique de fond de modélisation et de simulation de théorie du signal.*

C - Un second axe de travail visera à établir le compromis énergie-information au niveau semi-global, c'est-à-dire en considérant un ensemble de nœuds au voisinage d'un nœud de référence avec lesquels il est capable d'échanger de l'énergie et de l'information.

Pour ce deuxième axe, le capteur/actionneur précédent est doté d'une fonctionnalité supplémentaire de communication. Il peut ainsi se concerter avec ces voisins afin d'établir une stratégie de contrôle de vibration plus performante. Le travail mené doit alors permettre d'évaluer la quantité d'énergie impliquée dans ces communications en regard du gain en performance atteignable sur le contrôle de vibration.

D - Un troisième axe de travail visera à établir le compromis énergie-information au niveau global, c'est-à-dire en considérant l'ensemble des nœuds avec leurs interactions. Ici la plateforme de test prendra toute sa dimension puisque le cas applicatif de contrôle actif de vibration sera l'étalon qui permettra de valider l'ensemble de la démarche par comparaison avec le déploiement des méthodes conventionnelles (méthode  $H_\infty$ , etc).

*Ces deux derniers axes seront donc centrés sur une approche d'automatique distribuée dans le cadre du contrôle commande d'une structure vibrante.*

Ce sujet aborde le contrôle de vibration d'une structure mécanique selon trois axes : électronique, théorie du signal et automatique. Ce sujet pluridisciplinaire nécessitera que les trois dimensions soient explorées mais celles-ci seront adaptées en volume et poids dans la thèse en fonction du profil initial du candidat.

**Encadrement scientifique :**

▪ **Description du comité d'encadrement :**

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Mr Mieyeville Fabien	Ampère CoEngI / EE	Réseaux de capteur sans fil, Systèmes distribués, Récupération d'énergie, méthodes de conception hiérarchiques	50
Mr Huillery Julien	Ampère CoEngI / AIS	Traitement du signal, Estimation	30
Mr Korniienko Anton	Ampère CoEngI/ AIS	Commande Robuste et décentralisée	20

La dimension transversale du sujet nécessite un apport croisé d'expertise caractéristique de la dimension systémique de la recherche menée par la priorité CoEngI du laboratoire Ampère. Ainsi le sujet s'intéressant à la relation énergie-information sur le plan formel (expertise Julien Huillery) qui s'inscrit dans une dimension d'objets connectés (expertise Fabien Mieyeville) et mis en oeuvre au travers d'une application de contrôle actif distribué (expertise Anton Korniienko)

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s) (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)) :**

Le doctorant selon les temporalités de la thèse aura à partager son travail entre le site d'Ecully (bâtiment H9, Ecole Centrale de Lyon) et le site de Villeurbanne (Bâtiment Oméga, Université Claude Bernard Lyon 1)

**Financement de la thèse :** Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

**Profil du candidat recherché (prérequis) :**

Ingénieur ou titulaire d'un master à dominante Systèmes Électronique avec des compétences en Automatique et en Traitement du signal. Des compétences en Mécanique vibratoire et/ou en Électrotechnique seraient un plus. Le candidat doit également posséder un goût pour l'expérimentation, une bonne aisance en programmation et une bonne maîtrise de l'anglais.

**Objectifs de valorisation des travaux de recherche :**

1. Forme : publication, brevets, autres : publication et conférences internationales, le dépôt d'un brevet peut être envisageable selon la direction que prendra la thèse.
2. Volume de publications (conférence/revues, etc), brevets, autres : 1 revue internationale à comité de lecture, 1 conférence internationale et 1 conférence nationale par an à partir de la deuxième année.
3. Contraintes de confidentialité éventuelle : aucune.

**Compétences qui seront développées au cours du doctorat :**

Conception et développement de systèmes communicants, conception et implémentation de systèmes distribués de contrôle actif, optimisation hiérarchique de système électromécanique, développement de systèmes de contrôle commande distribués.

**Perspectives professionnelles après le doctorat :**

Carrière dans le secteur privé (développement et recherche) ou dans le secteur public (chercheur, enseignant-chercheur).

**Références bibliographiques sur le sujet de thèse :**

[1] K Zhang, G Scorletti, MN Ichchou, F Mieleville, Phase and gain control policies for robust active vibration control of flexible structures, *Smart Materials and Structures* 22 (7), 075025

[2] M. Zielinski, F. Mieleville, D. Navarro and O. Bareille, A Distributed Active Vibration Control System Based on the Wireless Sensor Network for Automotive Applications, *Advances in Network Systems: Architectures, Security, and Applications*, pp. 235-253, 2017.

[3] V. Nkemeni, F. Mieleville, et P. Tsafack, « A Distributed Computing Solution Based on Distributed Kalman Filter for Leak Detection in WSN-Based Water Pipeline Monitoring », *Sensors*, vol. 20, n° 18, p. 5204, sept. 2020, doi: 10.3390/s20185204.

- [4] Xavier Bombois, Debarghya Ghosh, Gérard Scorletti, Julien Huillery. LPV system identification for control using the local approach. *International Journal of Control*, Taylor & Francis, 2019, pp.1-21. 1. Scorletti G, Duc G. An LMI approach to decentralized H<sub>2</sub> control. *Int. J. Control* 2001; 74(3):211–224.
- [5] G. E. Dullerud and R. D'Andrea, "Distributed control of heterogeneous systems," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 12, pp. 2113-2128, Dec. 2004, doi: 10.1109/TAC.2004.838499.
- [6] Fax J, Murray R. Information flow and cooperative control of vehicle formations. *IEEE Trans. Aut. Control* Sep 2004; 49(9):1465 – 1476.
- [7] P. Wang, A. Korniienko, X. Bombois, M. Collet, G. Scorletti, E. Skow, C. Wang, K. Colin, Active vibration control in specific zones of smart structures, *Control Engineering Practice*, vol. 84, pp. 305-322, March 2019, DOI : 10.1016/j.conengprac.2018.12.005, hal-01984008.
- [8] A. Korniienko, G. Scorletti, E. Colinet, E. Blanco, Performance Control for Interconnection of Identical Systems : Application to PLL network design, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Wiley, vol. 26, no. 1, pp. 3-27, Jan. 2016, DOI : 10.1002/rnc.3285, hal-01083781.