

Laboratoire Ampère

UMR CNRS 5005

Automatique, Génie électrique, Bioingénierie

Rapport d'activité scientifique

2019-2022

Département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS)

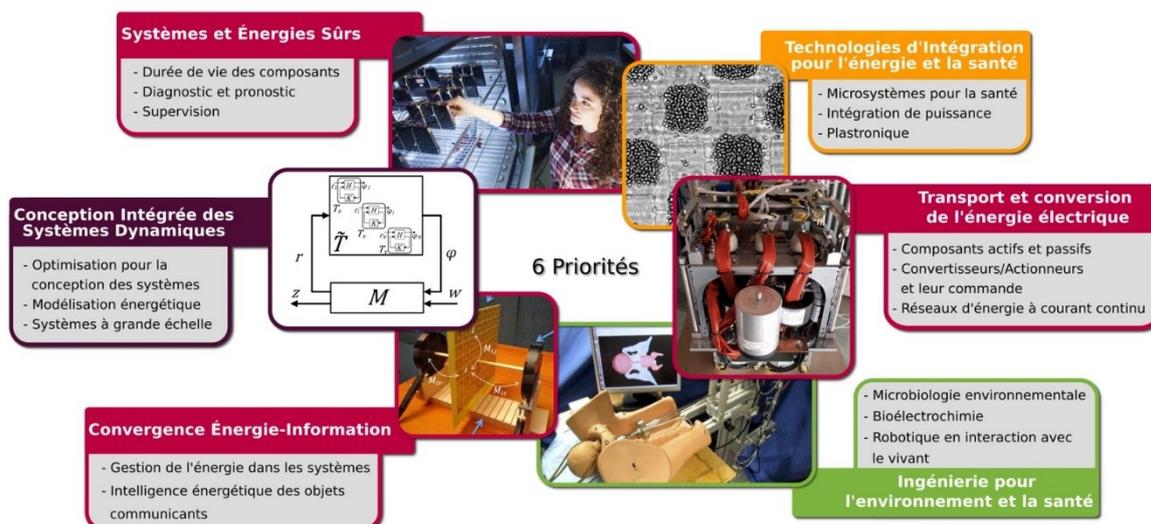
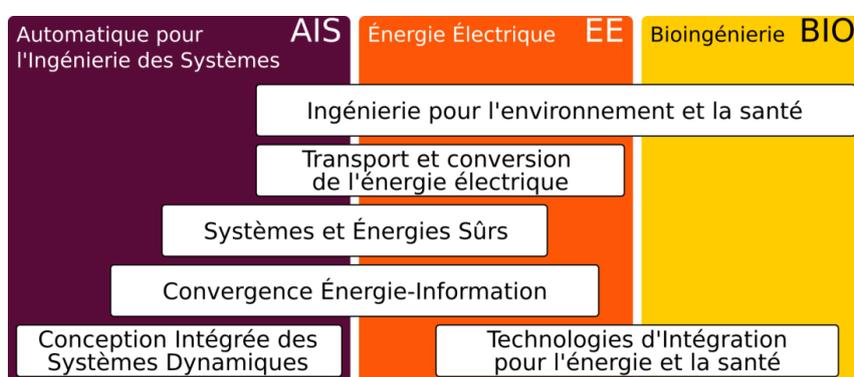


Table des matières

Le Laboratoire Ampère	3
1. Présentation générale du laboratoire Ampère	3
2. Focus Bio-Ingénierie	3
3. Focus Énergie Électrique	4
4. Focus Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes	4
Département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS)	5
1. Contexte et positionnement scientifique	5
2. Ecosystème du département	5
3. Effectifs et moyens	8
4. Production scientifique	11
5. Thématiques de recherche	13
a) Systèmes à grande échelle et de dimension infinie	13
b) Performance non-linéaire	15
c) Sécurité et Sécurité des Systèmes Cyber-Physiques.....	18
d) Commande des systèmes électriques	20
e) Fluides et multi-énergie	22
f) Robotique	25
6. Conclusions et Perspectives	28
Membres du département AIS (2019-2022)	29
Liste des thèses (2019-2022)	31
Plateaux techniques	33

Figures

Figure 1: Organisation Départements / Priorités au sein du Laboratoire Ampère.....	3
Figure 2 : Nature des financements du département AIS	10
Figure 3 : Répartition par nature du financement des thèses sur la période 2019-2022.....	10
Figure 4 : Evolution de la production scientifique depuis 2019	12
Figure 5 : Principales Revues de publication (au moins 1 publication/an).....	12

Tableaux

Tableau 1: Effectif des permanents selon leur discipline et leur situation géographique.....	8
Tableau 2 : Taux d'encadrement.....	9
Tableau 3 : Répartition selon leur nature des financements	9
Tableau 4 : Répartition des financements de thèse	9
Tableau 5 : Evolution annuelle de la production scientifique par type	11

Le Laboratoire Ampère

1. Présentation générale du laboratoire Ampère

Le laboratoire Ampère est spécialisé dans la gestion et l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les systèmes en relation avec leur environnement. Il développe pour cela des activités disciplinaires et transdisciplinaires portées par ses trois départements et ses six priorités.

Les trois départements portent une vision disciplinaire, et constituent une structure pérenne du laboratoire : automatique pour l'ingénierie des systèmes (AIS), bio-ingénierie (BIO) et énergie électrique (EE). Les 6 priorités visent à favoriser la transdisciplinarité, et sont redéfinies régulièrement, en fonction de l'émergence de nouveaux sujets ou besoins sociétaux.

Le laboratoire est une unité mixte de recherche (UMR 5005) du CNRS, de l'École Centrale de Lyon, de l'INSA de Lyon, et de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Au 17/5/2021, il regroupe 185 personnes, dont 83 doctorants et 75 chercheurs et enseignants-chercheurs. La production scientifique du laboratoire, de l'ordre de 90 articles revue et 120 communications en conférence par an, est accessible à l'adresse suivante : https://hal.archives-ouvertes.fr/AMPERE/search/index/?q=*.

Son budget annuel moyen, de l'ordre de 3 millions d'euros (hors salaire des personnels permanents) provient pour près de moitié d'institutionnels régionaux ou nationaux, 21% de financements industriels directs, 20 % de financements européens, et 11 % de ses dotations récurrentes.

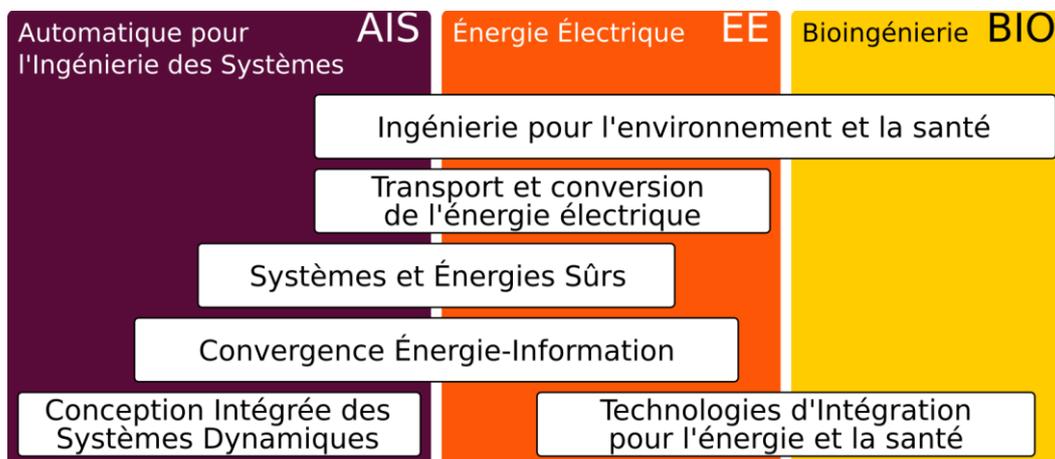


Figure 1: Organisation Départements / Priorités au sein du Laboratoire Ampère

2. Département Bio-Ingénierie (BIO)

L'objectif général du département bio-ingénierie est de faire émerger des concepts fondamentaux, des méthodes et des applications en bio-ingénierie suivant 2 grandes directions :

- l'étude et l'exploitation des potentialités d'adaptation et d'évolution des micro-organismes de l'environnement. Les thèmes abordés concernent, par exemple, l'étude de la contribution des archées et des bactéries au cycle de l'azote dans le sol, le fonctionnement des communautés microbiennes en milieu froid, et l'utilisation de micro-organismes dans la bio-remédiation de la pollution ;
- le développement de nouveaux outils d'analyse, systèmes ou procédés au service de la biologie et de l'environnement, par une combinaison des mathématiques appliquées, de la physique, de la chimie et des microtechnologies. Les thématiques abordées concernent la modélisation électromagnétique et la caractérisation multi-échelle des systèmes biologiques, le développement d'outils et méthodes pour le

tri cellulaire et la bio-détection, ainsi que le développement de systèmes bio-électro-chimiques pour le traitement des effluents et la production d'énergie.

Au 17/5/2021, le département bio-ingénierie regroupe 12 chercheurs et enseignants-chercheurs, 3 ingénieurs de recherche, 1 ingénieur d'études et 10 doctorants.

3. Département Énergie Électrique (EE)

Le département énergie électrique (EE) a pour objectif la création et l'optimisation des dispositifs de transport, de distribution et de conversion de l'énergie électrique en prenant en compte leur environnement. La gamme de puissances et d'énergies considérée est très vaste puisqu'elle va des micro-énergies (grappillage d'énergie, par exemple pour les objets et capteurs communicants) jusqu'aux grandes infrastructures énergétiques (transport d'énergie à grande distance, autoroutes de l'énergie destinées à faciliter la transition énergétique).

Les activités au sein du département EE sont caractérisées par :

- la volonté permanente de réponse aux défis sociétaux : diminution des pollutions par étude de matériaux plus écologiques de substitution ou par la réduction des besoins en matières premières ; amélioration des rendements de conversion, et de la gestion de l'énergie électrique ; amélioration de la durée de vie des matériels, notamment de stockage d'énergie électrique ;
- des relations partenariales très fortes, autant avec les PME qu'avec les groupes internationaux ;
- le regroupement de chercheurs venant de disciplines variées : matériaux magnétiques et diélectriques, composants passifs, composants actifs, structures d'électronique de puissance, technologies d'intégration

Au 17/5/2021, le département EE regroupe 29 chercheurs et enseignants chercheurs, 4 post-doctorants et 47 doctorants.

4. Département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS)

L'objectif général du département automatique pour l'ingénierie des systèmes est de développer des méthodologies et des outils visant l'optimisation et la maîtrise du comportement dynamique des systèmes et ce dans de très nombreux domaines d'applications.

L'association des dimensions théoriques et appliquées de ces recherches constitue la grande originalité de ce département scientifique dans le paysage national. Ainsi, les méthodes qui sont développées à partir d'outils issus des mathématiques appliquées se doivent d'être théoriquement démontrées avant d'être validées sur des applications concrètes mises en œuvre au laboratoire. Les principaux verrous scientifiques abordés par AIS concernent des méthodologies robustes de conception, de commande et d'observation incluant la prise en compte de l'efficacité énergétique dans le cas de systèmes physiques définis par des modèles non linéaires et à paramètres distribués. Les domaines d'applications du département sont très larges : énergie, transport, santé. Les recherches s'appuient sur des partenariats avec les industriels des secteurs du transport, de l'aéronautique, de l'aérospatial, de l'énergie et de l'électronique.

Au 17/5/2021, le département AIS regroupe 29 chercheurs et enseignants-chercheurs, 2 ingénieurs et 26 doctorants.

Département Automatique pour l'Ingénierie des Systèmes (AIS)

1. Contexte et positionnement scientifique

Depuis la création d'Ampère en 2006, il y a eu une évolution assez marquée des recherches en Automatique conduites au laboratoire. Initialement tournés vers le développement de méthodologies de conception, de dimensionnement et de commande pour des applications phares (Fluid Power et électronique de puissance) mais s'inspirant de travaux théoriques effectués dans d'autres laboratoires, nos travaux se sont élargis vers des développements plus fondamentaux. Cette évolution a été rendue possible par le recrutement de chercheurs ayant une affinité pour la recherche fondamentale, ou alliant recherches fondamentales et appliquées.

Les résultats théoriques obtenus sont issus d'une volonté forte de pousser cette recherche fondamentale. L'application fine de ces outils modernes de l'Automatique pour une application particulière, elle requiert néanmoins un savoir-faire et une double compétence de certains chercheurs. Cette interaction constitue la richesse du département, et lui permet de répondre aux défis actuels de l'industrie et de la société, caractérisés par la recherche de la meilleure performance possible avec un coût énergétique maîtrisé pour les systèmes de grande complexité. Ces enjeux induisent des questions de nature théorique qui nourrissent les recherches du département AIS et conduisent à des solutions et des méthodologies adaptées.

Le département AIS émerge dans la plupart des priorités scientifiques transversales en collaboration avec les autres départements ("Ingénierie pour l'Environnement et la Santé", IES ; "Transport et Conversion de l'Energie Electrique", TCEE ; "Systèmes et ENergie Sûrs", SENS ; "Convergence Energie-Information", CEI) et dans une priorité propre ("Commande Intégrée des Systèmes Dynamiques", CISD) dans laquelle se concentrent les travaux plus fondamentaux.

Le Département AIS est présent sur 2 des 3 sites du laboratoire (INSA Lyon et ECL).

2. Ecosystème du département

Bien évidemment, le département AIS, comme le laboratoire, inscrit ses activités en relation avec un nombre important de partenaires ou dans le cadre d'un nombre important de collaborations. Ces interactions se déroulent à proximité des chercheurs comme dans des structures éloignées. Il n'y a pas de stratégie a priori, ni de choix par opportunisme mais la construction de collaborations dans la durée. Ceci permet une approche incrémentale de nos activités de recherche, menée avec pragmatisme, qui nous permet d'extraire des perspectives et verrous scientifiques à plus long termes.

Ecosystème local

Les chercheurs interviennent dans la structuration de la recherche promue par les établissements, avec une convergence sur 3 enjeux principalement autour de l'énergie, du transport mais également de la santé. Dans une moindre mesure, nous interagissons avec un enjeu autour de la société numérique. Dans le cadre de ces enjeux le laboratoire participe à des projets collaboratifs, financés par les établissements (Bonus Qualité Recherche, masters ou thèses en codirection avec le LTDS, le CETHIL ou le LIRIS par exemple), par la filiale de valorisation INSAVALOR (Bonus Qualité Innovation), par l'Institut Carnot I@L (Abondement, action CARNAUTO, affichage de plateformes et promotions), la Société d'Accélération du Transfert de Technologies (SATT) PULSALYS (Projet WhatisIT) ou encore la Région AURA (R&D Booster : AUSCARA, Pack Ambition : AMITEIC).

Instituts pour la Transition Énergétique

L'ITE Supergrid est un acteur important pour le laboratoire bien que la trajectoire initiale ait été légèrement modifiée. Pour le département AIS, il y a 4 « mises à disposition » partielle de chercheurs permanents (J.Y.

GAUTHIER, X. LINSHI, A. HIJAZI, E. DUMITRESCU) et 3 thèses se sont déroulées en lien fort avec cette structure autour de la commande en électronique de puissance, de la supervision et de la sécurité des systèmes cyber-physiques.

ERC GEST

Une équipe de recherche commune avec l'Université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR), « ERC GEST » porte une activité soutenue autour du stockage pour la mobilité électrique, l'électrification de systèmes à travers l'optimisation des architectures hybrides et la gestion des flux d'énergie. Cette équipe implique 5 chercheurs au niveau du laboratoire, dont 2 du département AIS (A. HIJAZI, E. BIDEAUX).

FR 3539 Fuel Cell LAB (FCLAB)

Du fait du positionnement, les mêmes chercheurs se retrouvent dans la Fédération de Recherche FR 3539, Fuel Cell LAB, dont Ampère est devenu membre depuis 2017. Dans le cadre des Projets d'Investissement d'Avenir (PIA4), le département participe à 2 appels à projet apportant une dimension plus "système" autour de nouvelles idées en termes de développement et de commande de convertisseurs dédiés (projet TASE), de commande/observation du système/cœur de pile (2 brevets avec le CEA) et du dimensionnement des systèmes énergétiques modulaires (Projet HYSyPEM).

Control@Lyon

C'est un réseau créé en 2013 qui a pour vocation de rassembler les automaticiens de la place lyonnaise (Ampère et LAGEPP) en encourageant les séminaires pluri-mensuels avec l'intégration d'une grande partie des séminaires Ampère, et en organisant un workshop annuel (<https://sites.google.com/site/controlatlyon/>).

Participation aux Laboratoires d'Excellence (Labex)

PRIMES

Le Labex [PRIMES](#) (Physique, Radiobiologie, imagerie médicale et simulation) a pour objectif de développer de nouveaux concepts et méthodes pour l'exploration, le diagnostic et la thérapie du cancer et des pathologies associées au vieillissement. PRIMES recouvre des domaines variés allant de la physique fondamentale à l'instrumentation, de la radiobiologie à l'acquisition et au traitement de données et à la reconstruction d'images, simulation et modélisation à l'aide de l'informatique. Notre interaction avec ce Labex se fait au travers de collaboration avec le LIRIS.

Site Internet : <http://primes.universite-lyon.fr/>

Participation aux pôles de compétitivité

Le Laboratoire Ampère est en lien avec plusieurs pôles de compétitivité en lien avec ses activités de recherche pour la labélisation et le développement de collaborations industrielles (FUI, I-demo) :

- CARA : European Cluster for mobility solutions
- Tenerrdis : innovation pour les énergies renouvelables.
- MOV'EO, centré sur l'Automobile et les Transports publics
- ViaMeca dont les thématiques sont l'ingénierie des surfaces, les Procédés avancés de fabrication, les systèmes intelligents et l'ingénierie des usages et des services
- MINALOGIC dont les thématiques sont Micro et nanoélectronique, Photonique, Logiciel.
- TERRALIA pour la robotique agricole (projet ANR Greenshield)
- Lyonbiopole (Projet RHU ICELAND)

Groupements de Recherche (GDR)

GDR MACS / SAGIP:

Le GDR [MACS](#) 717 (Modélisation Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques) est le groupe de recherche qui rassemble les laboratoires et équipes de recherche en Automatique. Les chercheurs du département AIS sont donc fortement impliqués dans la vie de cette communauté et co-animent 2 comités Techniques de la [SAGIP](#) (Société d'Automatique, de Génie Industriel et de Productique) : Identif (Identification) et CSE (Commande des Systèmes Électriques), GT inter-SAGIP/GDR SEEDS. En outre, nous participons très régulièrement aux CT ATT (Automatique et Transports Terrestres), OSYDI (Outils pour l'analyse et la synthèse de Systèmes de Dimension Infinie), MOSAR (Méthodes et Outils pour la Synthèse et l'Analyse en Robustesse), SED (Systèmes à Événements Discrets), S3 (Sûreté / Surveillance / Supervision) et H2M (Health Management and Maintenance).

GDR SEEDS

Le GDR [SEEDS](#) 2994 (Systèmes d'Energie Electrique dans leur Dimension Sociétale) fédère l'ensemble des laboratoires et équipes académiques de génie électrique (du CNRS, du Ministère de la Recherche, et d'autres organismes de recherche). Le laboratoire Ampère s'est largement impliqué dans le GDR SEEDS. Le département AIS, en lien avec les autres départements, contribue aux différentes actions de ce GDR en particulier au niveau de la commande et de l'observation des systèmes électriques.

GDR Robotique

Le [GDR 3072](#) fait suite au GdR STIC/Santé où Tanneguy Redarce a co-animé le thème Robotique Médicale. Ce thème s'articule autour de trois thématiques : Modélisation et visualisation d'organes, Outils d'apprentissage, Interaction Homme/Machine. Ampère participe au thème « Apprentissage et assistance aux gestes médico-chirurgicaux » qui a pour vocation de favoriser les interactions entre les communautés médicales et scientifiques, d'améliorer leur visibilité par les milieux socio-économique, de répondre aux appels d'offres de l'ANR et de réaliser des plates-formes de démonstration.

GDR 2502 Contrôle des décollements

Le [GDR 2502](#) couvre un domaine encore peu exploré par la communauté des automaticiens : le contrôle des écoulements aérodynamiques. Les compétences du laboratoire ont conduit naturellement celui-ci à s'y intéresser depuis une dizaine d'années. Plusieurs chercheurs du département participent aux colloques semestriels de ce GDR très ouvert qui rassemble des chercheurs théoriciens et expérimentateurs en mécanique des fluides ainsi que quelques automaticiens.

Relations industrielles

Nos partenaires industriels sont nombreux et variés dans les domaines du transport terrestre, de l'aéronautique, des engins de chantier, des systèmes électriques, de l'électronique, des systèmes embarqués, ... Sans être exhaustif, on peut compter parmi nos principaux partenaires : Volvo Trucks, DGA, Vossloh Cogifer, Renault, Thalès, Naval Group, Chassis Brakes International, Hitachi, Emerson, Poclairn Hydraulics, Liebherr, Airbus, Alstom, Schneider Electric, Air Liquide, Tronic's Microsystems (TDK group), Microchip, KeepMotion, ... Il existe évidemment des liens privilégiés avec certains d'entre eux même si la continuité n'est pas toujours parfaite en raison des changements de priorités chez ces industriels, c'est par exemple le cas avec Renault, Schneider Electric ou Asco-Numatics-Emerson. Toutefois, il faut souligner des partenariats très étroits par exemple avec Volvo, historiquement sur le freinage pneumatique, et depuis 10 ans sur les problématiques d'hybridation et de mobilité électrique (avec tout récemment l'obtention d'une thèse financée par la chaire VOLVO-INSA et le dépôt

d'un projet Idemo sur l'électrification des remorques), ou encore avec Microchip autour de la commande en électronique de puissance.

Ces relations permettent aujourd'hui d'assurer 30% des moyens financiers et 30% des financements de thèse (CIFRE) du département mais aussi d'avoir un taux de placement dans l'industrie très important pour les docteurs formés au département AIS.

Positionnement international

A l'image du laboratoire, le département AIS bénéficie d'une large implantation internationale, principalement avec des partenaires en Belgique, Pays Bas, Brésil, Canada, Allemagne, Chine, Italie, mais aussi dans une moindre mesure en Algérie, Mexique, Colombie, Etats-Unis, Portugal, Liban, Maroc, Tunisie. Elles portent soit sur des contrats européens (INSTABAT), des projets internationaux (CONACYT), des thèses en cotutelle (NTNU, ISL), ou des collaborations bilatérales directes entre laboratoires.

Réseau d'excellence du Fluid Power : Global Fluid Power Society

Le laboratoire Ampère est membre fondateur du réseau international GFPS ([Global Fluid Power Society](#)) né de la fusion du réseau Fluid Power Centre in Europe (FPCE) et du réseau Fluid Power Network International (FPNI). Cette structure rassemble les principaux acteurs académiques et économiques du domaine. Il gère la coordination des conférences et congrès scientifiques, la formation (Masters, PhD, et post-doctorats) et met à disposition de la communauté la bibliographie du domaine. C'est aussi un point d'accès à des candidats de niveau international et à des emplois pour les doctorants.

3. Effectifs et moyens

Ressources humaines

Après une forte croissance du nombre de personnels permanents et de doctorants jusqu'en 2018, l'effectif du département AIS s'est aujourd'hui stabilisé (voir Annexe p.29). Il compte 28 chercheurs et enseignants/chercheurs titulaires relevant des sections CNU 61 et 63, et de la section 7 du CNRS. Le département bénéficie également du soutien de 2 ingénieurs de recherche (1 IR CNRS et 1 IR financé sur fonds propres). Nous accueillons une trentaine de doctorants, cet effectif variant au gré des projets et des prises de responsabilité en recherche ou en enseignement des permanents.

Même si géographiquement le centre de gravité se trouve sur le site de l'INSA (70% des EC/C) et que la coloration est à majorité automatique (93% des EC/C), les interactions avec le génie électrique restent fortes sur les 2 sites.

	Section CNU 61			Section CNU 63			CoNRS07		Total
	MCF	MCF HDR	PR	MCF	MCF HDR	PR	CR	DR	
INSA	10	4	4	1	-	1	-	-	20
ECL	4	2	1		-		-	1	8
Total	25			2			1		28¹

Tableau 1: Effectif des permanents selon leur discipline et leur situation géographique

En 2022, le département devrait se renforcer avec le recrutement de 2 Professeurs des Universités : 1 création à l'Ecole Centrale de Lyon sur une thématique d'optimisation pour l'Automatique et 1 poste sur l'INSA Lyon en Automatique pour la Robotique suite au départ de T. Redarce en 2021.

¹ Suite à son départ en retraite, T. Redarce (PR INSA) n'a pas été pris en compte dans les effectifs

Il faut également noter une très bonne dynamique parmi les jeunes Enseignants-Chercheurs avec 4 Habilitations à Diriger des Recherches soutenues depuis 2019 :

- P. MASSIONI (MCF 61, INSA, 2019) sur une thématique Systèmes Complexes.
- A. LELEVE (MCF 61, INSA, 2019) sur une thématique Formation au geste.
- R. DELPOUX (MCF 61, INSA, 2021) sur une thématique Commande des Systèmes Électriques.
- A. KORNIENKO (MCF 61, ECL, 2022) sur une thématique Commande Robuste et ses applications.

Formation à la recherche

Entre 2019 et 2022, nous avons eu le plaisir d'accueillir pas moins de 47 doctorants. Parmi eux, 21 ont soutenu leur thèse. Le nombre de doctorants est donc assez important et malgré un nombre de HDR en croissance, ceci représente **environ 3.6 doctorants par habilité**. Cette charge importante est pondérée par le volontarisme et l'implication dans le co-encadrement des jeunes maîtres de conférences.

Non HDR	HDR	Doctorants	Taux d'encadrement	Rapport non-HDR/HDR	Rapport Rang B/Rang A
15	13	47	3.6 doctorants/ HDR	1.15	3

Tableau 2 : Taux d'encadrement

Financements de la recherche

Les moyens financiers dont dispose le département représentent environ 850 k€/an ouverts à l'engagement avec une répartition équilibrée entre financements publics (45% au niveau national et 26% au niveau local) et privés (29%).

Institutionnel	1 929 170 €
ANR	303 460
BPI	914 104
CARNOT	113 200
ETABLISSEMENT	60 754
EUROPE	286 000
RP REGION	251 652
Privés	777 156 €
Total (sur 3,25 ans)	2 706 327 €

Tableau 3 : Répartition selon leur nature des financements entre 2019 et 2022

Contrats doctoraux	11
Bourses projets institutionnels (ANR, FUI, Europe, ...)	10
Bourses Instituts (CEA, CNRS, Supergrid ...)	6
CIFRE	9
Bourses pays étrangers (CSC, ...)	9
Bourses Région	1
Autre	1
Total	47

Tableau 4 : Répartition des financements de thèse

Presque la moitié des financements publics du département (48%) provient de projets FUI, financés par la BPI, qui s'appuient sur des collaborations avec d'autres laboratoires et des industriels. C'est le cas des projets Next4MEMS (1 M€) et RAILMON (434 k€). La part de l'ANR (ACTIV'Road et GREENSHIELD), à travers des projets collaboratifs "plus amonts", représente environ 15% de nos financements institutionnels, au même niveau que les financements de la Région ou locaux (établissements, Région). En 2020, nous avons obtenu un financement européen à travers le projet INSTABAT, dans lequel nous avons en charge le workpackage sur le développement de capteurs virtuels pour les batteries (BMS). Ceci constitue certainement un beau tremplin pour les travaux

concernant la commande et l'observation des systèmes régis par des équations aux dérivées partielles. Le taux de réussite pour les projets déposés n'est pas exceptionnel mais reste dans la moyenne nationale (environ 15% à l'ANR).

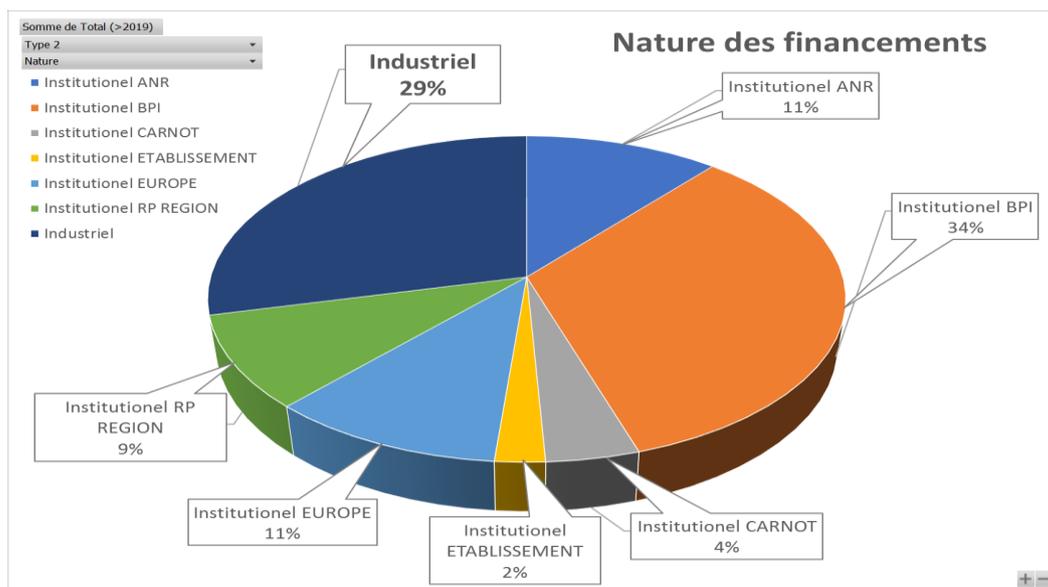


Figure 2 : Nature des financements du département AIS

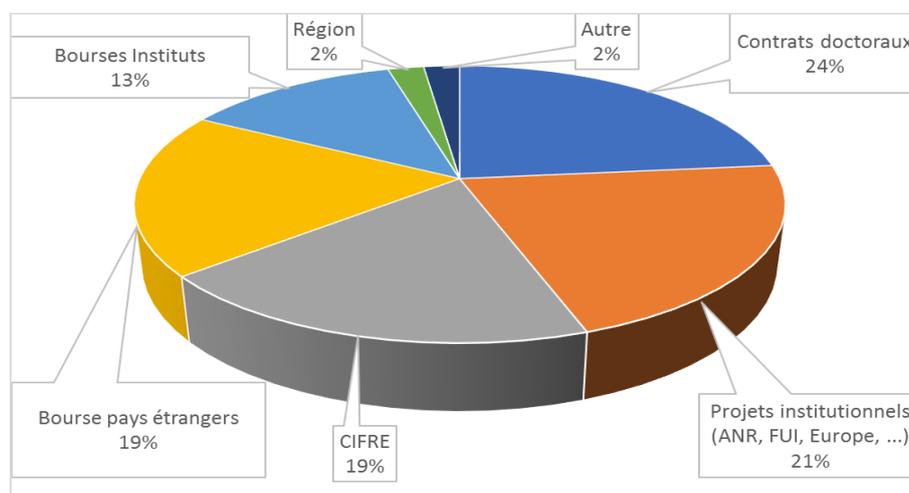


Figure 3 : Répartition par nature du financement des thèses sur la période 2019-2022

Les conventions de recherche industrielles et les CIFRE, 9 depuis 2019, représentent également une part conséquente du financement de la recherche du département. Malgré la charge supplémentaire, inhérente à ce type d'activité, c'est un moyen aujourd'hui incontournable d'accroître le nombre de doctorants.

Comme le montre le tableau ci-dessous, la nature des financements de thèse est très diversifiée ce qui permet de garantir un flux à peu près continu de doctorants.

Comme le montrent nos moyens financiers et la nature des financements de thèse, le département a su donner les moyens de bénéficier d'une grande variété de sources de financement pour ses travaux de recherche et le recrutement de ses doctorants. En plus des allocations doctorales, des financements sur projet et des CIFRE, le département bénéficie d'un nombre non négligeable de bourses issues de nos collaborations avec des instituts comme le CEA et SuperGrid. **Cette diversité est l'un de nos atouts majeurs résultant de notre politique scientifique.**

Toutefois, comme indiqué précédemment, la pression sur les Enseignants Chercheurs et Chercheurs HDR est aujourd'hui assez forte (3.6 doctorants / HDR).

Liens avec des plateaux techniques

A l'instar de nombreuses équipes d'Automatique, le département AIS dispose de ses propres moyens d'essais ce qui permet d'une part de concrétiser les résultats de nos recherches fondamentales et d'autre part de faire remonter des problématiques nées des applications. C'est aussi un outil essentiel pour nos relations avec les industriels. Nous nous appuyons principalement sur 2 plateaux techniques :

- Conversion statique, réseaux et machines électriques (Annexe 1)
- Transmission de puissance, Robotique et Fluid Power (Annexe 2), plateau qui dispose de moyens expérimentaux uniques est également utilisé par d'autres laboratoires (CETIM) et des industriels (PARKER).

De plus dans le cadre de certains projets, nous avons eu accès à d'autres plateaux comme par exemple : la soufflerie du laboratoire Pprime à Poitiers (ANR Activ'Road), les bancs de test de piles à combustible (LITEN-CEA), les tests sur hexapodes avec satellite de communication embarqué (Thales), des véhicules (Chassis Brakes International), des chaînes de traction électriques (CARNAUTO), les modèles de poutres vibrantes du LTDS, ou encore le banc d'essais VOLVO-Trucks de la Ruche industrielle sur lequel nous testons des cyber-attaques industrielles (prise de contrôle malveillante de l'installation physique).

4. Production scientifique

L'ensemble de la production scientifique du département est disponible sur HAL : [2019-2020](#) et [2021-2022](#)

- Article de revue (RICL) : [2019, 2020](#) et [2021, 2022](#)
- Communications en Conférences Internationale(CICL) : [2019, 2020](#) et [2021, 2022](#)
- Ouvrages et chapitres d'ouvrages : [2019, 2020](#) et [2021, 2022](#)
- Brevets et Logiciels : [2019, 2020](#) et [2021, 2022](#)
- Thèses et Habilitations à diriger des recherches : [2019, 2020](#) et [2021, 2022](#)

La production scientifique du département est en moyenne 1.7 RICL/an/ECTP et de 1,8 CICL/an/ECTP. L'évolution observée (Figure 4) reflète parfaitement l'effet de la pandémie avec une baisse significative des communications en conférences internationales en 2020 et 2021. Concernant les 21 thèses et 4 HDR soutenues, on observe là très peu de variation annuelle.

	2019	2020	2021	2022	Total
RICL	23	21	25	6	75
CICL	37	29	16	1	81
Ouvrage et Chapitre	-	3	1	-	4
Brevets / Logiciels	0	2	1	-	3
Thèse	6	7	6	2	21
HDR	2	-	1	1	4

Tableau 5 : Evolution annuelle de la production scientifique par type

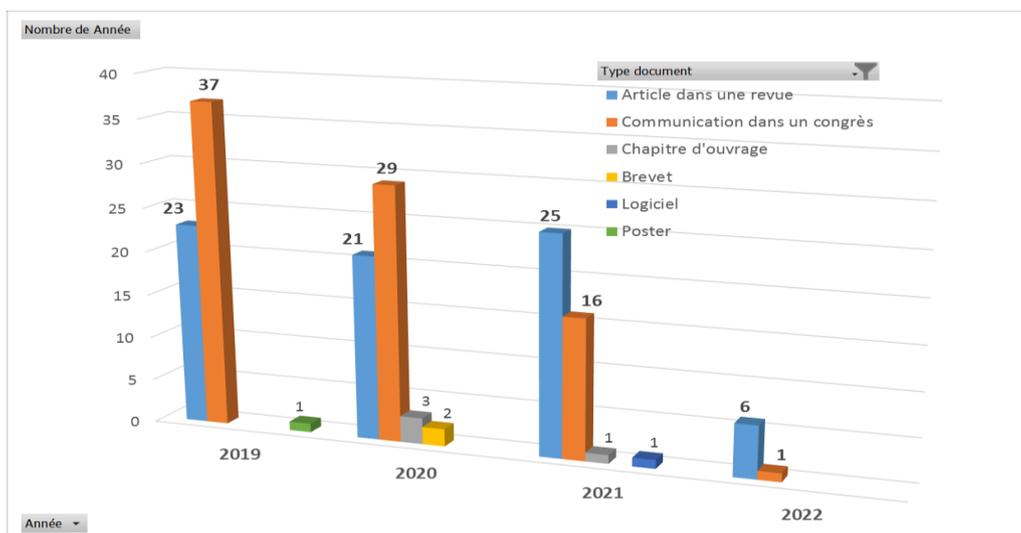


Figure 4 : Evolution de la production scientifique depuis 2019

A titre indicatif, la Figure 5 dresse le bilan des revues dans lesquelles nous avons publié en moyenne au moins une fois par an. On retrouve certaines revues de référence pour les publications théoriques en Automatique (Automatica, International Journal of Robust and Nonlinear Control, IEEE Control Systems Letters et IEEE Transactions on Automatic Control) et en Automatique appliquée (Control Engineering Practice et IEEE Transactions on Industrial Electronics).

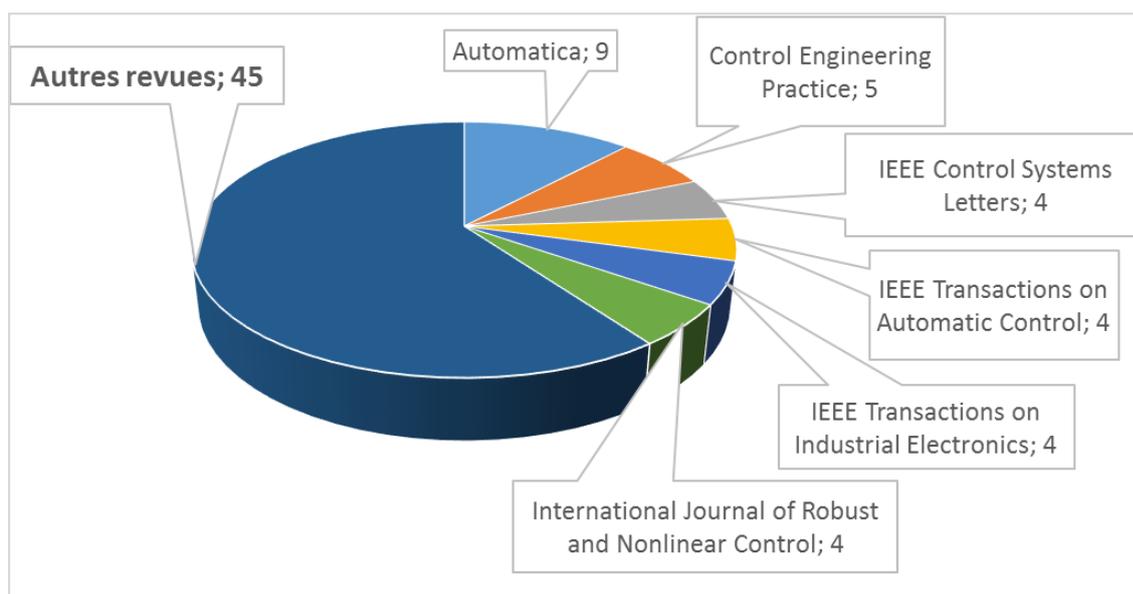


Figure 5 : Principales Revues de publication (au moins 1 publication/an)

5. Thématiques de recherche

Au cours des dernières années, les activités de recherche du département AIS se sont renforcées et, par la même occasion, diversifiées. En effet, à l'heure actuelle, le département AIS accueille des chercheurs capables d'allier contributions théoriques solides et développements méthodologiques adaptés à une classe d'applications stratégiques pour le laboratoire. Ceci n'a pas remis en cause les thématiques historiques au sein du département mais a diversifié ses activités tout en leur donnant encore plus de pertinence vis-à-vis de nouvelles classes de problèmes applicatifs qui échappaient jusque-là au périmètre scientifique du département. Par exemple, nous nous intéressons aujourd'hui à la sécurité des systèmes cyber-physiques, avec le point de vue de l'Automaticien, en alliant outils et méthodes de l'Automatique continue et des Systèmes à Evènements Discrets.

Centré principalement sur le système, sa modélisation, sa conception et sa commande, le département aborde donc des problèmes amonts à travers des **développements méthodologiques et des outils numériques, avec la prise en compte de spécificités propres aux applications pour le développement de méthodologies dédiées**. Ces travaux s'inscrivent parfaitement dans la **communauté automatique** et apportent avec une approche système originale des contributions importantes sur les priorités scientifiques du laboratoire, en particulier sur les **enjeux de la conversion énergétique**.

a) Systèmes à grande échelle et de dimension infinie

Mots clés : Systèmes interconnectés, commande décentralisée, hiérarchisation, localisation distribuée, systèmes à paramètres répartis, systèmes à retard, backstepping, approximation

Positionnement scientifique

Cette activité concerne le développement de méthodes efficaces à complexité réduite pour les systèmes de grande dimension ou de dimension infinie. Elle vise des méthodes qui permettent d'analyser, de commander et d'optimiser des systèmes de grande dimension, que ce soit des systèmes en réseau à plusieurs capteurs/actionneurs ou bien des systèmes de dimension infinie ou finie avec une structure distribuée dans l'espace. Le défi principal posé par cette classe de systèmes est le maintien d'une complexité algorithmique réduite des méthodes vis-à-vis de la grande dimension des modèles utilisés. La thématique inclut des résultats généraux de nature théorique, mais aussi des résultats applicatifs dans les domaines de l'optique adaptative des grands télescopes, des réseaux électriques, des vibrations mécaniques, des circuits de résonateurs électroniques ou de l'électrochimie.

Problématiques abordées

Les systèmes à grande échelle sont de plus en plus présents dans l'industrie sous forme de réseaux du fait des progrès de la technologie (miniaturisation, robotique, réseaux de communication et de distribution d'énergie) ou du besoin accru de performance des systèmes pour lequel la nature distribuée en espace doit être prise en compte. L'identification, l'analyse et la commande de ces systèmes à grande échelle doivent donc s'appuyer sur des méthodes adaptées à leur échelle, pour éviter l'explosion de leur complexité avec l'augmentation de la taille.

La modélisation, la compréhension du comportement et le contrôle des systèmes à grande échelle constituent des verrous scientifiques majeurs. Parmi les nombreux défis scientifiques posés par la thématique, nous nous sommes intéressés à : 1) la simplification de modèles, avec les approches issues de la robustesse, de la commande hiérarchisée ou encore des transformations dans l'espace d'état ; 2) le développement de l'automatique pour l'adapter aux systèmes interconnectés, dans le cadre d'un réseau ou d'un contrôle frontière;

3) pour l'identification, l'analyse fine des conséquences des interconnexions sur la conception des expériences et l'identification pour la commande en réseau.

1. Interconnexion à grande échelle

Un réseau dynamique est caractérisé par l'interconnexion (possiblement complexe) d'un (grand) nombre de systèmes dynamiques. La performance des systèmes dynamiques peut être en général évaluée par des calculs dont la complexité augmente avec l'ordre du système. Il devient alors fondamental d'étendre la théorie des systèmes en intégrant la notion d'efficacité/complexité réduite.

Concernant l'identification, en se basant sur nos travaux antérieurs sur l'identification des réseaux dynamiques [[hal-01355016](#)], nous avons développé une méthodologie pour identifier les différents systèmes pour un réseau multi-agents et pour la synthèse optimale de cette expérience d'identification ([[hal-01492050](#)], [[hal-03336912](#)]). Nous avons également développé des méthodologies d'identification pour déduire la topologie d'un réseau dynamique [[hal-03038398](#)] et travaillé sur l'informativité des données dans le cadre de l'identification de tels réseaux dynamiques [[hal-03329586](#)]. Ces résultats ont été importants pour l'identification de modèles de tout ou partie d'un réseau électrique ([[hal-03141205](#)], [[hal-02642471](#)]).

Pour le volet analyse et synthèse de performance de systèmes en réseaux, l'activité s'est concentrée sur l'extension de méthodes efficaces, basées sur la relaxation et l'optimisation convexe, pour répondre aux enjeux de performance robuste de ces systèmes [[hal-01861477](#)].

Pour les réseaux à structure hiérarchisée, une méthode d'analyse de la performance robuste efficace basée sur la résolution de problèmes d'optimisation convexe parallélisables [[hal-01616980](#)]. Des méthodes indépendantes de l'échelle d'un réseau pour l'analyse de performance ont également été développées dans [[hal-01064040](#)], avec des applications aux systèmes hétérogènes. Une extension de la factorisation spectrale à la synthèse LFR [[hal-01984416](#)] a également permis de proposer une méthode de synthèse de filtres fréquentiels composés d'une interconnexion de résonateurs adaptés aux nouveaux défis de télécommunication 5G [[hal-03010860](#)], [[hal-01984417](#)].

2. Dimension infinie

L'enrichissement de modèles pour répondre aux besoins accrus de performance conduit dans certains cas à s'intéresser aux systèmes de dimension infinie, décrits par des équations aux dérivées partielles ou des équations à retard.

Dans cette thématique, nous avons développé des méthodes originales d'approximation de modèle à complexité réduite avec garantie de performance dans [[hal-01281589](#)], en exploitant des classes de modèles à retard. Ce travail de reformulation de modèles complexes a été poursuivi en exploitant des transformations intégrales (Volterra ou Fredholm) pour des systèmes d'équations aux dérivées partielles paraboliques ou hyperboliques. En particulier la technique de "backstepping" a permis le développement de *capteurs virtuels* pour l'estimation de l'état électrochimique d'une batterie de Lithium-ion, ce qui constitue la contribution principale du laboratoire Ampère au projet H2020 INSTABAT. L'utilisation de ces transformations intégrales a permis aussi des avancées dans l'analyse de stabilité et la reformulation de certains problèmes de stabilisation, observation et tracking concernant des équations aux dérivées partielles hyperboliques comme des problèmes faisant apparaître des systèmes à retard [[hal-01644149](#)].

Résultats

Les résultats ne se limitent pas aux développements théoriques, mais ont inclus plusieurs projets à cheval avec l'application pratique dans plusieurs domaines.

Le projet "Commande Robuste pour la Conception et l'Analyse de filtre BAW" financé par la région Rhône-Alpes ARC6 en collaboration avec le CEA a reçu une lettre de soutien de TDK grâce à son importance et l'intérêt dans le développement des technologies de télécommunication 5G futures.

Le projet H2020 "Innovative physical/virtual sensor platform for battery cell" (INSTABAT) financé par la Commission Européenne où on développe des outils d'estimation d'état pour des modèles électrochimiques de batteries Lithium-ion intégrés à une plateforme multi-capteur pour une cellule de batterie.

Perspectives

Les systèmes interconnectés peuvent être modélisés de manière non unique et il est possible de choisir leur structure hiérarchique. L'exploitation de ce nouveau degré de liberté pour réduire la complexité ou le niveau de conservatisme du résultat obtenu en analyse hiérarchisée de la robustesse constitue une perspective très intéressante. Une autre piste intéressante est l'utilisation de la démarche proposée pour analyser la performance des algorithmes issus de l'apprentissage par données.

Concernant les systèmes en dimension infinie, des perspectives d'application dans le domaine du stockage et production d'énergie électrochimique, en particulier des batteries d'ion de Lithium, des piles à combustible et la production d'Hydrogène par électrolyse se dégagent à court et moyen terme. Ces applications sont dans la continuité de méthodes développées et testées dans le cadre du projet INSTABAT. D'un point de vue méthodologique, des perspectives sur la composition de transformations intégrales et des méthodes récursives se dégagent, avec des applications potentielles à des systèmes en dimension infinie interconnectés aux bords avec différentes topologies possibles. Enfin, une autre perspective concerne l'exploration de la notion d'inversion dynamique et son utilisation pour la régulation de sortie de systèmes complexes, de grande dimension ou de dimension infinie.

Bilan de l'activité

Projets : ARC 6 Rhône-Alpes, CMIRA, Ecos-Sud/Conicyt, ANR JCJC, H2020 INSTABAT

Thèses en cours (4): Eva MARKIEWICZ, Meaghan PODLASKI, Arsalan ASIF, Hamza BENADADA.

Thèses Soutenues depuis 2019 (5): Kévin MARIETTE (2020, à l'interface avec Fluides et Multi-énergie), Kévin LAUZIER (2020, à l'interface avec Commande des systèmes électriques / Fluides et Multi-énergie), Sigurd JAKOBSEN (2019), Fédérico MORELLI (2021), Arthur. PERODOU ([tel-02487272](tel:02487272)).

Collaborations Universitaires : Norwegian Univ. Of Science and Technology, Swedish Royal Inst. of Technology, Rensselaer Polytechnic Inst. (NY, USA), INL, LTDS, LIALP/DACLE/CEA, CAS Mines ParisTech, CINVESTAV (Mexique), GIPSA-Lab, Univ. Técnica Federico Santa Maria (Chili), LAAS, Univ. of California (Berkeley, USA), Tufts University, Centrale-Supélec

Collaborations Industrielles : Infineon* (Allemagne), Varta* (Autriche), BMW* (Allemagne), Faurecia* (Allemagne), Air Liquide (France), PSA, VOLVO.

(*) Dans le cadre du projet européen INSTABAT

b) Performance non-linéaire

Mots clés : Performance, robustesse, systèmes Linéaires Temps Variants, à Paramètres Variants, Affines par Morceaux, Commutés, Non-linéaires, identification, observation, commande, déconvolution, estimation, analyse, optimisation efficace, conception électronique, contrôle de vibration, aéronautique

Positionnement scientifique

Centrée sur l'identification, l'observation, l'analyse et la commande / conception de systèmes complexes, la thématique combine une recherche amont avec une recherche collaborative appliquée. L'augmentation des exigences de performance et d'efficacité énergétique des systèmes dynamiques, associée au raccourcissement de leur cycle de conception a rendu impérative l'amélioration de la maîtrise du processus de conception. La recherche du compromis performance-énergie a rendu cruciale la prise en compte des incertitudes de représentation et des aspects temps variant ou non linéaires. L'objectif est ici de proposer des méthodologies

pour la conception de systèmes de haute performance à base de modèles allant de l'étape de modélisation jusqu'à celle de validation. L'optimisation conjointe des étapes se base sur le développement d'un cadre unifié pour aborder l'identification, l'observation, l'analyse et la commande. Les cadres théoriques et les méthodes basées sur l'optimisation sont développés afin de garantir un bon compromis entre le conservatisme, la complexité algorithmique et l'adéquation des méthodes aux domaines applicatifs visés.

Problématiques abordées

Les travaux ont principalement porté sur l'identification, l'observation et l'identification pour la commande avec pour enjeu la prise en compte de bruits non standards et d'incertitudes de modèle. L'identification et l'observation à partir de mesures corrompues par des bruits avec des composantes denses et impulsives sont considérées (attaques de canaux communication, fautes capteurs, etc.), afin de construire des estimateurs (statiques ou adaptatifs) ayant la propriété de résilience. La conception d'estimateurs basée sur la résolution de problèmes d'optimisation a été appliquée aux systèmes discrets, LTI [[hal-03181789](#)] et LTV [[hal-03424305](#)]. Par ailleurs, les observateurs par intervalles ont été étudiés [[hal-02152005](#)] ainsi que les méthodes basées sur la parcimonie [[hal-03542247](#)].

L'identification pour la commande vise à obtenir le modèle d'un système à commander à partir de données expérimentales pour synthétiser le correcteur. La performance atteinte dépend fortement de l'incertitude de modélisation qui est fonction des conditions expérimentales (durée, signal d'excitation). Nous avons développé nos travaux sur la synthèse optimale de l'expérience d'identification la moins perturbatrice pour le système menant néanmoins à un modèle suffisamment précis pour la synthèse d'un correcteur satisfaisant en performance. Durant la période concernée, nous avons amélioré notre paradigme de synthèse optimale de l'expérience d'identification en la rendant plus robuste [[hal-02363067](#)]. Un logiciel sur le sujet a été également développé [[hal-03175027](#)]. Par ailleurs, l'informativité des données a été étudiée dans le cas des systèmes multivariables en boucle ouverte [[hal-02305057](#)] et en boucle fermée [[hal-02351669](#)], ainsi que pour un certain type de systèmes non-linéaires [[hal-02392113](#)].

L'idée est de capitaliser sur les méthodes efficaces des systèmes LTI pour aborder des systèmes non linéaires en considérant des modèles proches des modèles LTI représenter le comportement non-linéaire : linéaires à paramètres variants (LPV), linéaires temps variants (LTV) et affines par morceaux (PWA). Les modèles LPV ont été abordés pour l'extension de la synthèse optimale de l'expérience d'identification pour la commande au cas des systèmes non-linéaires, en particulier par la synthèse optimale d'une expérience d'identification de type locale [[hal-02102192](#)]. Le cadre LTV a permis d'aborder la commande par modulation/démodulation. Si elle est largement utilisée (machines électriques, les capteurs inertiels résonants, etc..) de par son intérêt pratique important, elle souffrait du manque d'une méthode de synthèse rigoureuse et efficace. Nos travaux dans le projet Next4MEMS ont permis d'en proposer une, avec les outils associés d'analyse de la robustesse, voir [[tel-03363650](#), [hal-03093309](#), [hal-03091710](#)]. Les travaux sur les systèmes PWA ont abordé l'analyse de la performance incrémentale en présence d'incertitudes par optimisation convexe [[hal-02151787](#)], motivé par le profond intérêt de la performance incrémentale pour la commande en poursuite et en régulation des systèmes non-linéaires, voir [[hal-03541392](#)]. Ils ont par ailleurs permis d'analyser les commandes par modulation de largeur d'impulsion [[hal-02361609](#)]. Les outils d'optimisation ont été appliqués à l'estimation de systèmes non-linéaires [[hal-02154905](#)].

Résultats

Parallèlement aux développements théoriques, l'originalité de la thématique est de travailler à l'évolution des méthodes de conception appliquées dans différents domaines tels que l'électronique, la mécanique ou l'aéronautique à travers des collaborations de longue durée avec des chercheurs/ingénieurs spécialistes de ceux-ci. Il s'agit de nourrir les problématiques théoriques par les enjeux applicatifs afin de proposer de nouvelles méthodes les plus adaptées à la réalité pratique. En conception électronique, l'intégration dans le consortium du projet Pôle Structurant Pôle de Compétitivité NEXT4MEMS dans le domaine de capteur inertielle MEMS a

permis de développer de nouvelles architectures d'électronique et les méthodes de conception associées [[tel-03363650](tel:03363650), [tel-03114994](tel:03114994), [tel-03267982](tel:03267982)]. Leur intégration effective dans le flux de conception du partenaire industriel a permis d'améliorer la performance de 40%. Cette démarche se retrouve dans la collaboration avec les mécaniciens (LTDS) sur le contrôle actif de vibrations de structures, menant à une méthodologie d'identification et de commande, ainsi que l'instrumentation d'un banc d'essai expérimental [<hal-01984008>]. Les méthodes ici développées s'appliquent naturellement à l'aéronautique et au spatial [<hal-01721646>]. Trois projets collaboratifs avec des industriels (Airbus Operations, Thales, Liebherr Aerospace) sur thèses CIFRE et un projet CEA proposent une démarche d'optimisation dans différents types de problèmes, dont la commande optimale pour avions souples de nouvelle génération [<hal-03282401>], l'estimation d'attitude, la conception de circuits de air bleed des moteurs ou encore la localisation de drones [<hal-03230678>].

Perspectives

Elles portent, d'une part, sur le prolongement des travaux actuels. Une des forces de la thématique est le développement de l'identification pour la commande, en co-développant des travaux en identification et en commande. L'objectif est de l'étendre à la modélisation et à la commande par réseaux de neurones, les approches par erreur de prédiction, commande LPV et analyse incrémentale offrant un cadre favorable. Concernant l'estimation, les efforts vont porter sur l'estimation robuste et résiliente avec application aux systèmes hybrides (identification, observation et commande), en particulier sur l'analyse non-asymptotique des estimateurs robustes. Pour la commande non-linéaire, l'ambition est de développer la synthèse efficace de correcteurs garantissant la performance incrémentale en combinant l'approche LPV et le théorème de la moyenne.

Il s'agit, d'autre part, d'élargir le spectre des recherches appliquées en abordant l'analyse de la performance des algorithmes en particulier pour les systèmes cyber-physiques. L'originalité est ici d'exploiter le point de vue théorie des systèmes, au lieu d'un regard purement « informatique », les outils fondamentaux de la thématique (séparation de graphes, S-procédure, sum of squares) ouvrant la voie à l'extension des résultats existants.

Les perspectives sont intéressantes pour les applications aéronautiques, spatiales et (micro)électroniques, en particuliers en association avec des entreprises confrontées à des besoins de plus en plus important en méthodes avancées pour garantir le niveau de performance et de sécurité désiré pour leurs systèmes, typiquement fortement non linéaires et complexes.

Bilan de l'activité

Projets : Next4MEMS, Structronics@lyon (Carnot Ingénierie@Lyon), LOPSY (Carnot CEA LETI/MINATEC), CIFRE Airbus Operations, CIFRE Thales, CIFRE Tronics

Thèses en cours (7): Cécile PERNIN, Halem OULD-LAHSEM, Gabriel DE CARVALHO FERREIRA, Hugo FOURNIER, Laetitia TOSONI, Quentin BRUEL, Alain UWADUKUNZE

Thèses Soutenues depuis 2019 (6): Jérémy BARRA (2022), Jorge AYALA-CUEVAS (2021), Alexandre KIRCHER (2021), Fabricio SAGGIN (2021), Kévin COLIN (2020), Peng WANG (2019)

Collaborations Universitaires : CEA Grenoble, CRAN (Université de Lorraine), LIAS (Université de Poitiers), INRAE, LTDS, Politecnico di Milano

Collaborations Industrielles : Airbus Operations, Asygn, Liebherr Aerospace, Thales, Tronic's Microsystems (TDK group), Institut de Recherche Franco-Allemand de St Louis (ISL)

c) *Sûreté et Sécurité des Systèmes Cyber-Physiques*

Mots clés : Surveillance de l'état de santé, maintenance prédictive, diagnostic, pronostic, reconfiguration, conception sûre, détection et prévention de cyber-attaques.

Positionnement scientifique

Le cœur de cette activité se positionne dans la maîtrise et la gestion des aléas de fonctionnement dans les systèmes cyber-physiques complexes. Il s'agit de développer des méthodes, des modèles et des outils permettant, en contexte incertain, de comprendre et de maîtriser la dynamique des systèmes étudiés à différentes échelles de temps (continue et à événements discrets), pour garantir des performances qui soient les plus conformes aux exigences attendues.

Les incertitudes que nous considérons peuvent être des aléas de fonctionnement (comme des pannes des équipements, par exemple), des incertitudes sur l'environnement (arrivée de nouvelles demandes ou changement de modes de pilotage, par exemple), des aléas majeurs, ou risques majeurs (comme la dispersion chimique, par exemple) ou encore des pannes ou défaillances provoquées intentionnellement (cyber-attaques). Dans le cadre de ces nouveaux enjeux (la cyber malveillance) la maîtrise du comportement des systèmes physiques, de leur commande et de leur vulnérabilité ouvre de nouvelles perspectives nous permettant par exemple de repérer des comportements anormaux au sein même des signaux de commande/observation révélant des intentionnalités de nuire.

Ainsi, dans tel un environnement fortement incertain, où la variabilité influe sur les causes communes et spéciales, une boucle réactive intégrée au système de pilotage dynamique doit permettre de quantifier et de maîtriser en situation et de façon évolutive l'impact sur les risques inhérents à la fiabilité des équipements et/ou des infrastructures et/ou des organisations. C'est ce caractère incertain des aléas auquel nous nous intéressons, qu'ils soient naturels ou intentionnels, dans des environnements complexes, interconnectés, multi-physiques et présentant des risques variés, qui constituent pour cette activité un véritable défi.

Problématiques scientifiques

Les problématiques scientifiques traitées se déclinent selon quatre axes majeurs. Les **deux premiers axes** prennent en compte l'**analyse corrélée entre les signaux de commande (potentiellement détournés à des fins malveillantes) et ceux de captage (approche à base de modèles comportementaux déterministes)** alors que le **troisième axe** se focalise exclusivement sur les **signaux de captage (l'absence de la composante commande nécessitant le recours à des approches hybridant modèles déterministes et probabilistes (IA))**. Enfin, le **quatrième axe** se consacre à la **conception sûre du pilotage dynamique de systèmes cyber-physiques**.

Le premier axe porte sur le développement d'une approche de type filtre à base de modèles comportementaux, à événements discrets, permettant de caractériser si les ordres envoyés à des actionneurs par un contrôleur industriel présentent un caractère intentionnellement dégradant. De nature méthodologique, l'approche développée permet de définir et d'implanter des mécanismes de détection, à base de modèles comportementaux déterministes, placés au plus proche du système physique. Elle se fonde sur une hybridation d'une technique orientée sécurité (Intrusion Detection System) et sûreté (filtre de commandes, filtre d'observations) cherchant à évaluer en temps réel la distance et la trajectoire vis-à-vis d'un objectif de commande et d'un état critique compromettant l'intégrité du système physique si atteint [[hal-02073775](#)].

Le second axe a permis de définir les concepts et les mécanismes de prévention d'attaques de contrôleurs continus visant à accélérer le vieillissement des actionneurs commandés. Les méthodes proposées sont principalement fondées sur celles ensemblistes, et en particulier sur l'utilisation d'ensemble ellipsoïdal. L'approche revendiquée est basée sur l'analyse d'atteignabilité des systèmes dynamiques soumis à des cyber-attaques pour ensuite imposer des contraintes sur la sortie des contrôleurs continus afin de limiter l'impact des cyber-attaques.

Le troisième axe, démarré en septembre 2021, et supporté par la BPI au travers du projet PSCP RAILMON, vise à détecter et diagnostiquer des attaques portant sur une prise de contrôle malveillante des données de captage dans le secteur du transport ferroviaire ; les attaques pouvant conduire à des déclenchements de maintenance correctives inutiles ou à provoquer des incidents graves. La problématique majeure de ces travaux réside d'une part dans la caractérisation d'un niveau de confiance à associer aux données remontées au niveau national par un ensemble important de centrales de mesures isolées et réparties sur le territoire, mais également par l'impossibilité de corrélérer ces mesures aux signaux de commande générés vers les équipements de terrain. L'approche vise à proposer des modèles corrélant des comportements déterministes ou aléatoires issus de la physique (aiguillage, vibrations, passage à niveaux, ligne, etc.).

Le quatrième axe, démarré en 2015 et supporté par l'Institut Supergrid se consacre à la **conception sûre de logiques séquentielles de contrôle-commande** dans un **environnement distribué et communicant**, en prenant en compte les aléas tels que les pannes d'éléments de la partie opérative, mais en supposant que la fonction de communication reste, elle, non altérée. Afin de maîtriser la complexité due à la fois à la taille des systèmes manipulés et à la concurrence, conjointe à des contraintes de synchronisation, des approches structurelles et modales sont explorées.

Résultats

Les travaux de l'axe 1 ont permis le démarrage d'une collaboration étroite entre la Direction Générale de l'Armement et le laboratoire AMPERE. Celle-ci se poursuit dans le cadre d'une extension de l'approche de détection à base de modèles comportementaux physiques pour un contrôleur industriel à la surveillance du comportement d'une flotte de contrôleurs supervisés soumis à des attaques furtives visant à provoquer un "blocage mortel" (Deadlock) du système cyber-physique sur la base de l'outil S3P [[hal-03625481](#)].

Le développement d'une méthodologie de conception de filtres de commande pour la prévention d'attaques cyber a permis de valider en simulation la totalité des résultats théoriques obtenus [[hal-03278990](#), [hal-03621662](#)]. Ils se poursuivent actuellement dans le cadre d'une collaboration internationale récente (démarrée en février 2021) avec Dr. Carlos Murguia (Eindhoven University of Technology) dans le domaine de la sécurisation des installations industrielles soumises à des cyber-attaques visant à dégrader les actionneurs.

La démarche de conception sûre centrée sur la gestion de modes a été développée et appliquée à un cas d'étude industriel: une composante de réseau très haute tension (HVDC) chez Supergrid. Le contrôle-commande distribué a été généré automatiquement, puis validé par simulation physique, et prototypé [[hal-03059144v1](#), [hal-03621801v1](#)].

Perspectives

Les perspectives à nos travaux visent à conforter et étendre d'une part notre expertise dans le domaine de la sûreté de fonctionnement et d'autre part de développer l'axe sécurité des systèmes cyber-physiques tant sur les aspects théoriques qu'applicatifs.

Pour celles qui relèvent de la sûreté, il s'agira de développer une approche globale permettant de concevoir des systèmes de contrôle-commande sûrs répondant aux défis et verrous suivants :

- hybrider des modèles fonctionnels et dysfonctionnels pour améliorer la robustesse et la réactivité des approches de supervision,
- contourner les limites algorithmiques (complexité) inhérentes aux outils de vérification et de synthèse afin d'envisager des passages à l'échelle des approches proposées,
- adapter les modèles et fonctions de contrôle-commande développées aux systèmes cyber-physiques distribués, assurant une cohésion globale à partir de processus communicants locaux,
- faire évoluer nos modèles et algorithmes pour prendre en compte non seulement plus de contextes (multi-causes, multi-modes forte variabilité) des procédés considérés mais également tendre vers davantage de prédictivité dans les approches de diagnostic afin d'améliorer la réactivité des systèmes de reconfiguration proposés.

En ce qui concerne la gestion de la menace cyber, de nouveaux défis sont à relever : caractériser l'intelligence de l'attaque (son niveau de furtivité, son intentionnalité, ses objectifs), identifier des situations redoutées (anticipation et reconnaissance de scénarii d'attaques), anticiper l'atteignabilité de scénarii redoutés, diagnostiquer les causes intentionnelles ou naturelles d'une défaillance, aider à la reconfiguration et à la reprise d'activité suite à attaque.

Notre double expertise dans le domaine de sûreté et de la commande est une force pour intégrer désormais ce nouveau paradigme. Les nouvelles approches seront développées dans des secteurs d'importances vitales d'un point de vue sociétal : Energie, Défense, Transport, et Production et se développeront non seulement dans le cadre de partenariats à ce jour formalisés (DGA, Vossloh Cogifer, SuperGrid)) et à étendre mais également dans le cadre de partenariats institutionnels nationaux et internationaux. L'activité devra s'appuyer sur le développement de plateformes technologiques à échelle réelle pour tester et valider les approches développées. Ainsi la plateforme industrielle de SMART-RAO (salle de transfert) se verra prochainement étendue et mise à jour en termes de contrôleurs industriels (continus et discrets), de systèmes de pilotage représentatifs (SCADA et MES) et équipée de dispositifs du marché permettant à ce jour de prévenir et détecter d'éventuelles intrusions.

Bilan de l'activité

Projets : DGA MI, RAILMON, SuperGrid

Thèses en cours (4): MOLINA-BAROS Lucas (Supergrid, 2019), BEAUDET Amaury (DGA, 2020), NGUYEN Dinh Duy Kha (projet PSPC RailMon, 2022), ABDELLAOUI Sara (projet PSPC RailMon, 2022).

Thèses Soutenues depuis 2019 (1): Cédric Escudero (Contrat doctoral, 2017)

Collaborations Universitaires : Eindhoven University of Technology, Higher Colleges of Technology, INRIA Rhone-Alpes

Collaborations Industrielles : Supergrid Institute, Vossloh, DGA, La Ruche Industrielle, (à venir : Schneider, Naval Group, JMConcept, ...).

d) Commande des systèmes électriques

Mots clefs : Automatique, électronique de puissance, pilotage de machines électriques, convertisseurs de puissance, commande hiérarchisée, systèmes modulaires

Positionnement scientifique

Cette activité se positionne entre les disciplines de l'Electrotechnique et l'Electronique de Puissance (ETEP) d'une part, et l'Automatique d'autre part : l'objectif est de tirer parti d'une **connaissance fine de la physique des systèmes d'ETEP** et d'une expertise sur certains **outils de l'Automatique**, identifiés comme pertinents pour ces applications. L'accent est mis tant sur la théorie que l'expérimentation avec la mise au point d'algorithmes de commande rigoureux mis en œuvre sur des bancs expérimentaux à des fins de recherche mais aussi de transfert technologique en partenariat avec des industriels.

Problématiques abordées

Pour faire face aux préoccupations environnementales, les systèmes électriques (moteurs, convertisseurs) représentent un réel enjeu sociétal pour l'avenir. Les **applications phares** sur lesquelles le groupe possède une

expertise et souhaite approfondir ses recherches sont les **machines électriques** et les **convertisseurs de puissance** dans des domaines applicatifs tels que les transports propres ou la gestion de l'énergie pour un développement durable tels que les réseaux continus maillés. L'étude pluridisciplinaire (Etep, Automatique) des systèmes que nous considérons permet la mise à jour des hypothèses sous-jacentes portant notamment sur la rapidité des différentes dynamiques mises en jeu ; ceci afin de proposer une hiérarchisation des objectifs de commande et proposer des **solutions modulaires**, multi-fréquentielle de problèmes classiques de l'Etep prenant en compte, non seulement les commutations, mais également les différents modes de fonctionnement, ainsi que les saturations qui doivent permettre d'améliorer les performances du système (suivi de trajectoire). L'expérience du laboratoire sur le prototypage rapide de loi de commande permet la validation expérimentale des solutions de commande en tenant compte très tôt dans la synthèse de loi de commande des contraintes temps réels de mise en œuvre.

Résultats

Les activités du Laboratoire Ampère sur la Commande des Systèmes Électriques sont bien identifiées sur le plan national et en fort développement sur le plan international. L'attractivité de cette thématique a connu une forte progression concernant le nombre de doctorants et de collaborations industrielles. Les expertises et les formations dans le domaine ont été nombreuses (SNR, EFI Automotive, Chassis Brakes International, Hitachi). Sur le plan local, nous sommes clairement identifiés au sein de l'INSA qui soutient notre développement via des bourses ministérielles dans le cadre des enjeux Énergie et Transport (3 doctorants sur la période concernée dont un 1er prix de thèse obtenu).

Sur le plan national nous sommes impliqués au Comité technique sur la Commande des Systèmes Électriques (inter GDR SAGIP/SEEDS), nous venons d'organiser une journée à Lyon avec 40 participants (31 mars 2022). Nous avons aujourd'hui réussi à faire collaborer au sein d'un même laboratoire, dans ce groupe, des chercheurs dans le domaine de l'Automatique et du Génie Électrique.

Sur le plan international nous avons accueilli différents professeurs invités (Jesus DE LEON- Mexique, Marc BODSON – USA, Ali MOHAMMADI- Fidji, Fei WANG - Shanghai University) et développé ou maintenu différentes collaborations (voir ci-après Bilan de l'activité).

Les résultats scientifiques qui peuvent être mis en exergue depuis 2019 sont :

- Développement de techniques de commande basées sur l'allocation de commande pour la gestion optimale des flux de puissance dans des convertisseurs modulaires DC/DC, thèse Jérémie KREISS [[tel-029358221](tel:029358221)]
- Contribution à la conversion AC/DC en Haute Tension en collaboration avec l'Institut Supergrid, thèse de Pierre-Baptiste STECKLER : [[tel-031773051](tel:031773051)]
- Synthèse et mise en œuvre expérimentale de lois de commande à relais appliqué à sur l'interconnexion de convertisseurs DC-DC en parallèle dans le cas incertain, thèse de Aboubacar NDOYE [[tel-036215711](tel:036215711)]
- Développement et commande d'un système d'entraînement de machine synchrone alimentée par un onduleur qui intègre une tolérance au défaut d'une phase ouverte et un étage de conversion continu/continu en utilisant le point neutre de la machine [<hal-03353429>], thèse de Xiaokang ZANG soutenue le 24 mars 2022.
- Ainsi que les différentes thèses en cours dans le domaine du pilotage (modélisation, identification, commande, observateurs, diagnostic) de convertisseurs, machines et réseaux électriques. Avec un objectif très souvent orienté au niveau d'une meilleure gestion de l'énergie avec une volonté d'avoir une approche de plus en plus orientée éco-optimisation, éco-conception.

Faits marquants :

- "Un dispositif de freinage 100 % électrique" : [Lettre de l'Innovation du CNRS](#) du 27 février 2020.
- Projet R&D Booster AUSCARA : 1er véhicule 100 % autonome au monde à se brancher et se charger sans intervention humaine présenté : Au 32ème symposium international du véhicule électrique

(EVS32) en 2019 : <https://youtu.be/46PykN9WqXc> et aux Techdays de la région AuRA en 2020 à Lyon : <https://youtu.be/y6hkTuTLawII>

- Prix de thèse de Jérémie KREISS dans l'enjeu sociétal "Energie pour un développement durable" de l'INSA Lyon en 2019.

Perspectives

- Fort de l'expérience sur les convertisseurs, l'objectif est d'étendre les systèmes électriques aux réseaux électriques et plus particulièrement réseaux électriques continus.
- Les machines électriques sont de plus en plus utilisées en vue de l'électrification alors que la présence de terres rares pose question. Nous avons identifié la commande de machines électriques sans terre rare comme un défi (Low tech, écoconception, prise en compte de la commande dans la conception). Cela passe par la remise en cause des modèles classiquement utilisés et la caractérisation des machines.
- Prise en compte des défaillances (logicielles et matérielles) avec des approches modulaires et redondantes.
- La littérature en automatique est abondante en méthodes avancées de commande, d'observation et d'identification s'adaptant à toutes sortes de spécifications et de systèmes (non-linéarité, saturation, robustesse, optimalité, etc.). Une perspective vise à prendre en compte les contraintes temps-réel, de la conception, l'optimisation à la mise en œuvre expérimentale de la loi de commande, ceci en fournissant des solutions de commande embarquées intelligentes (flexibles, reconfigurables).

Bilan de l'activité

Projets : ITE Supergrid (Délégations de personnels et contrats), GdR SEEDS, HACK- μ GRID, Région AURA : Auscara, Industriels : Chassis Brakes International, EFI Automotive, Airbus, IFPEN, Keep Motion.

Thèses en cours (6): Laurent SCHULLER (ministérielle, enjeu INSA, 2019), Tanguy SIMON (ministérielle, enjeu INSA, 2019), Simon UICICH (CIFRE Airbus, 2019), Louis DASSONVILLE (CIFRE Keep motion 2020), Antoine SABRIE (IFPEN 2020), Adrien PREVOST (ministérielle, enjeu INSA, 2021).

Thèses Soutenues depuis 2019 (5): Jérémie KREISS (ministérielle, 2016 - 2019), Kévin LAUZIER (CIFRE Air Liquide, 2017 - 2020), Pierre-Baptiste STECKLER (SuperGrid Institute 2017 - 2020), Aboubacar NDOYE (ministérielle 2018 - 2021), Xiaokang ZHANG (Bourse CSC, 2018-2022)

Collaborations Universitaires : Shanghai University, Shanghai Maritime University, University of Utah, Universidad Autonoma de Nuevo Leon, University of the South Pacific, Laboratoire Cristal, Laboratoire Geeps, LAAS CNRS.

Collaborations industrielles : Airbus, Air Liquide, Alstom, Chassis Brakes International, EFI Automotive, IFPEN, Keep motion, Microchip, SuperGrid Institute.

e) Fluides et multi-énergie

Mots clés : *Modélisation* (Simulation multiphysique, Approches énergétiques, Caractérisations physiques), *Commande* (Commande/observation non linéaires multivariables), *Optimisation* (Conception de systèmes dynamiques), *Applications* (Systèmes pneumatiques, hydrauliques, électriques, ... Contrôle actif pour l'aérodynamique, Sous/Sur-actionnement, Systèmes commutés, hybridation des sources et des chaînes d'actionnement).

Positionnement scientifique et originalité

Cette thématique de recherche historique au laboratoire Ampère constitue une problématique scientifique à la fois pluridisciplinaire et très spécifique où les interactions entre compétences méthodologiques et pratiques permettent un enrichissement mutuel et d'apporter des solutions nouvelles. Ces travaux se basent tout d'abord sur une forte compétence en modélisation qui s'appuie sur des approches numériques et expérimentales ainsi que sur une connaissance approfondie de la technologie et des théories physiques. Notre bonne maîtrise du modèle (mathématique et technologique), même s'il est le plus souvent non linéaire et de grande dimension, permet de développer des lois de commande ou des observateurs qui garantissent les meilleures performances pour un vaste domaine de fonctionnement de ces applications. L'originalité de nos recherches, qui adressent des problèmes génériques en Automatique, est de naître ou de se concrétiser à travers l'application.

Ces activités s'appuient sur une expérience acquise depuis plus de 40 ans. Nos travaux ont contribué à développer de nouvelles approches et connaissances, historiquement pour les systèmes de transmission de puissance à fluide sous pression (Fluid Power) et la Robotique. Au niveau français, ce domaine est une spécificité d'Ampère, seul laboratoire français faisant partie depuis 20 ans du réseau mondial GFPS qui rassemble les principaux laboratoires du domaine. Ces 10 dernières années, les interactions avec des chercheurs en Génie électrique du laboratoire ont permis d'étendre notre expertise à l'ensemble des chaînes de transmission de puissance quelle que soit la nature du flux d'énergie manipulé (électrique, pneumatique, hydraulique, ...). Ces nouvelles compétences nous donnent une vue objective sur la plupart des architectures hybrides multi-énergie, de disposer de méthodologies adaptées à chacune d'elles pour la modélisation, le dimensionnement, l'analyse et la commande. C'est une expertise reconnue dans notre communauté scientifique et par les industriels.

Problématiques scientifiques

L'efficacité énergétique des systèmes d'actionnement et la gestion optimale des flux d'énergie à prestations identiques est un enjeu sociétal important avec un impact considérable dans le domaine du transport ou de la production industrielle. Nous abordons ces problématiques selon différents angles : le développement de nouvelles technologies, l'optimisation de nouvelles architectures hybrides, de la synthèse de lois de commande tenant compte des impacts environnementaux qui peuvent nécessiter la reconstruction de grandeurs physiques coûteuses ou non accessibles.

Nos démarches s'appuient sur des outils de modélisation énergétique tels que le Bond Graph pour structurer la représentation de systèmes multi-physiques, bien souvent non linéaires ou encore régis par des équations aux dérivées partielles. A travers cette approche, nous développons des outils d'analyse structurelle au sens de l'Automatique afin de bien poser les problèmes de synthèse de commande et d'inversion de modèles multi-variables, ou encore d'optimisation. Ces outils méthodologiques sont associés à des approches numériques (Bellman, Pontryagin, Mixed-Integer (Non)Linear Programming, Branch & Bound, ...) pour résoudre le problème d'optimisation couplé commande-dimensionnement propre à la problématique des systèmes multi-énergie. Dans ce contexte, nos travaux consistent à formaliser de manière générique les problèmes et proposer des outils de réduction des temps de calcul tout en garantissant l'optimalité, ce qui constitue la difficulté majeure de cette thématique.

Résultats

Dans le cadre de la commande des actionneurs pneumatiques, nous avons poursuivi nos travaux s'appuyant sur des électrovannes rapides et la synthèse des lois de commande s'appuyant sur les techniques développées pour les systèmes à commutation. Il s'agit ici de réduire les coûts tout en améliorant les performances. Ces résultats ont été mis en œuvre avec succès dans le cadre d'un régulateur de pression pour l'aéronautique (communication dans une conférence reportée en juin, thèse de Gabriel de CARVALHO, CIFRE LIEBHERR). Nous avons également participé au projet Activ'Road dont l'objectif était de réduire la traînée aérodynamique d'un véhicule (PL ou VL) à l'aide de jets d'air pulsés générés des électrovannes commutant à haute fréquence (1 kHz). Un travail plus amont a été engagé sur la modélisation puis la synthèse de lois de commande en boucle fermée permettant de

réduire la trainée en dans différents contextes et de garantir la robustesse du contrôle tout en recherchant l'optimum énergétique. Ce domaine encore très peu abordé par la communauté automatique ouvre des problématiques très intéressantes du point de vue de l'automatique théorique et est l'occasion d'un travail commun avec la thématique "Systèmes de dimension infinie". Les résultats majeurs concernent d'une part la boucle locale comme le contrôle en position d'un écoulement bistable à l'aide d'une commande de type mode glissant [[hal-02985576v1](#)] et d'autre part, la recherche automatique de la commande optimale des "blocs" d'actionnement selon différents critères (rendement global, symétrie du sillage, ...) en s'appuyant sur des techniques de type "Extremum Seeking" [[hal-03002158v1](#)].

Dans le cadre l'optimisation des systèmes multi-énergie, nos travaux ont également conduit à des résultats très originaux, valorisés par une start-up LikeWatt avec l'appui de la SATT PULSALYS. Dans le cadre de la thèse de X. HUIN (CIFRE Volvo), nous avons fait évoluer les méthodes d'optimisation couplée commande-dimensionnement, initialement développées dans la thèse d'A. CHAUVIN [[hal-01873447v1](#)], afin d'optimiser les spécifications du moteur thermique (caractéristique vitesse-couple rendement) d'une motorisation hybride de véhicule industriel [[hal-03465521v1](#)]. Nous sommes également intéressés à la formulation analytique de la sensibilité de la solution du problème d'optimisation couplé à des variations paramétriques ou de trajectoire de référence afin d'évaluer à moindre coût la robustesse des solutions [[hal-03465526v1](#)].

Perspectives

Les perspectives concernant cette thématique sont nombreuses. Tout d'abord, nous poursuivons le développement des outils d'aide à la conception par analyse structurelle dans le cadre du système d'air d'un avion "air bleed system" (G. de CARVHLO, CIFRE LIEBHERR) en associant les méthodes existantes à des approches plus numériques (LPV et résolutions de LMI) développées dans la thématique "Performances non linéaires".

Nous envisageons aussi de pousser l'analogie avec l'électronique de puissance (hacheur, buck, boost, ...) et de transposer cette fois-ci ces technologies aux systèmes hydrauliques. Sur ce sujet, en plus de la thèse de J. DARNET (CIFRE Poclain), nous pourrions nous appuyer sur les 2 thèses du projet P4Hydro (projet I-demo) qui doit démarrer en juin 2022, et sur une toute nouvelle technologie d'électrovannes rapides piézoélectriques commutant à en 0.5 ms. La "digitalisation" des systèmes hydrauliques constitue un enjeu majeur des prochaines années et c'est une opportunité pour le laboratoire.

Le temps de calcul ainsi que la gestion des incertitudes et la robustesse de la solution d'un problème d'optimisation couplé commande-dimensionnement reste un enjeu majeur de la conception des systèmes multi-énergie. Dans le cadre du projet CORRES, nous poursuivons les travaux sur la prise en compte des incertitudes mais aussi de l'occurrence d'événements critiques (par ex. un événement climatique) d'un réseau de chaleur en lien avec le réseau électrique (Grid-to-Power). Nous envisageons d'introduire la notion d'incertitude dans le problème d'optimisation et de développer une démarche générique de construction des fonctions de sensibilité pour traiter le problème d'événements critiques. Enfin, dans la thèse d'E. PLANTE (CEA), nous nous intéresserons à la parallélisation du calcul et à l'optimisation des paramètres de loi de commande (et non plus au calcul de la commande optimale en boucle ouverte).

Bilan de l'activité

Projets : ACTIV'Road (ANR), POCLAIN Hydraulics (CIFRE), VOLVO (CIFRE), Volvo Chaire INSA, LIEBHERR Aerospace (CIFRE), CORRES (CARNOT Interlabo), LIKEWATT (Pulsalys), WHAT4NOW, PROCOPE MEDICALS, CETIM.

Thèses en cours (5): T. VAEZI (Contrat doctoral), Gabriel de CARVALHO (CIFRE LIEBHERR), Hamza METTALI (Projet CORRES co-direction CETHIL), Justin DARNET (CIFRE Poclain), Essolizam PLANTE (Co-direction CEA)

Thèses Soutenues depuis 2019 (2): Kevin MARIETTE (ACTIV'ROAD 2020), Xavier HUIN (CIFRE Volvo 2021)

Collaborations universitaires : GFPS (Global Fluid Power Society), E. Noppe (Roberval, UTC), S. Chabane (CETIM, Senlis), T. Castellain (LMFA, Centrale Lyon), J. Boré (Pprime, Poitiers), M. Gérard (CEA-LITEN), M. Clausse (CETHIL).

Collaborations Industrielles : ALSTOM, Renault, Volvo, TEREX Crane, Asco-Numatics, Parker, Haulotte, CNES, LikeWatt, Atlantic, MOOG, POCLAIN Hydraulics, LIEBHERR Aerospace, Cerebrum

f) Robotique

Mots clés : Haptique, simulateurs médicaux, analyse du geste, commande de fluide sous pression (backstepping, sliding mode), commande bilatérale

Positionnement scientifique et originalité

Cette activité en fort développement depuis 2014 concerne l'étude de méthodes et d'outils appliqués au domaine médical. Grâce à des liens forts avec le monde hospitalier, l'activité se concentre sur des besoins de formation pratique et en bloc opératoires.

Elle répond aux besoins des médecins à travers le développement de simulateurs pédagogiques efficaces pour la formation à des gestes techniques complexes. Ainsi, notre activité principale est le développement de simulateurs pédagogiques haptiques dédiés aux gestes techniques médico-chirurgicaux. Ils permettent de restituer des sensations plus réalistes et paramétrables que les simulateurs actuels du commerce. Par rapport à la communauté nationale ou internationale c'est une thématique assez originale car elle permet de s'affranchir des contraintes de la salle d'opération et de s'intéresser à la formation initiale et continue des praticiens. En effet, la plupart des travaux de recherche actuels se concentrent sur la robotique pre-opératoire.

Problématiques scientifiques

Parmi les verrous scientifiques clairement identifiés, le plus important abordé par l'activité concerne la **modélisation du vivant** (par ex. déformation des tissus mous) et des **interactions instruments/organes**, pour reproduire fidèlement les conditions opératoires, grâce au retour d'effort et/ou à la comanipulation.

Par ailleurs, l'un des points forts sur lequel nous travaillons est le **guidage en temps interactif d'outils**, pour l'apprentissage du geste.

Ces applications nous ont amené à développer diverses lois de commande. Nous avons ainsi mis en place des **lois de commande non linéaires** (notamment *backstepping*) pour reproduire des sensations haptiques spécifiques avec des **actionnements hybrides** (pneumatique et électrique). Des **lois de commande en raideur multi-énergie et multi-ddl** (Birthsim [[hal-01682127](#)], Pérism [[hal-02170879](#)]) ont également été étudiées.

Nous avons d'autre part développé une activité de **simulation haptique supervisée** (apprenant et formateur ensemble dans la simulation) [Doctorats Liu et Licon]. Pour cela, nous avons proposé un **modèle énergétique** (modélisation par ports hamiltoniens) d'une architecture passive de **téléopération à plusieurs maîtres**.

Les systèmes robotiques s'appuient généralement sur un **triptyque Perception / Décision / Action**. Nous travaillons donc sur des aspects de perception et d'apprentissage du geste. Plus précisément, les recherches et contributions scientifiques de ce thème concernent **l'étude et la mise au point d'outils d'évaluation objective** des apprenants [[tel-01368173](tel:01368173)] faisant appel notamment à de **nouvelles métriques** telles que la vitesse affine et des techniques de traitements (DTW, DALW, ...) et d'analyse des données (ACP, ...).

Cette activité s'accompagne d'une activité (secondaire) de robotique industrielle et agricole mettant en œuvre les compétences générales de l'équipe (conception, identification, commande de robots). Elle est aussi un terrain d'application pour les recherches en automatique des autres équipes du laboratoire. Elle fait le lien

(bidirectionnel) entre les approches de modélisation énergétique et la commande de systèmes électriques, pneumatiques et hydrauliques.

Résultats

Dans le cadre du doctorat de Thibault SENAC (2016-19), nous avons développé un simulateur complet d'apprentissage de la péridurale. L'actionnement pneumatique a été utilisé pour développer une interface haptique originale afin de reproduire le comportement d'une seringue [[hal-02176436](#)]. Cet actionnement a ensuite été couplé avec un actionneur électrique afin de reproduire différents rendus haptiques (traversée des tissus et diffusion d'un liquide dans les tissus). Le simulateur permet également d'enregistrer les gestes réalisés en vue de leur évaluation [[hal-03092054](#)]. Le prototype réalisé a permis de former 12 internes anesthésistes dans le cadre de leur formation initiale et de valider son principe et son utilité. Une collaboration avec une start-up lyonnaise est actuellement en cours de validation pour installer un prototype à l'hôpital.

Concernant le doctorat de Maria de los Angeles ALAMILLA DANIEL (2017-20) [[tel-03078578](#)], un simulateur pour la ponction articulaire a été élaboré. Outre la partie commande qui a pu être mise en place pour reproduire le comportement de tissus mous [[hal-03068204](#)], une originalité de ce travail a été d'intégrer la partie commande dans la partie numérique virtuelle temps réel du simulateur [publication en révision mineure]. Ce travail s'est fait en collaboration avec le LIRIS.

Pour être complet, ces simulateurs doivent aussi prendre en compte la manière d'apprendre un geste technique que ce soit d'un point de vue cognitif ou pédagogique. Pour cela, nous collaborons avec d'autres laboratoires pour tenir compte de ces spécificités. Nous avons pu ainsi valider une approche didactique sur le geste de la laparoscopie (collaboration avec LIBM) [[hal-03174365](#)] ou étudier la proprioception (collaboration avec l'INSERM) [[hal-03086481](#)]. Une fois les gestes enregistrés, nous avons pu tester et valider des critères d'évaluation en vue de classer, d'un point de vue cinématique et dynamique un expert et un novice (collaboration avec l'Universidad Nacional de Bogotá) [[hal-02108054](#)].

Perspectives

Dans la continuité de nos recherches dans le domaine des simulateurs dédiés à l'apprentissage des gestes médico-chirurgicaux, plusieurs pistes seront explorées. Le développement de tels simulateurs nécessite de travailler sur la commande d'actionneurs en vue de reproduire le comportement des tissus/organes humains. Pour cela, nous souhaitons développer des actionneurs innovants comme des actionneurs hybrides couplant plusieurs sources d'énergie afin de tirer profit de chaque actionnement (rapport volume/puissance, intégration dans un prototype, rapport efforts max/efforts min, amplitude, dynamique, gestion des éventuelles non linéarités, ...). Ces actionneurs hybrides doivent reproduire différents types de patients afin de permettre aux praticiens de se confronter à différentes situations sans changer de matériel. Le projet ANR HASPA (actuellement en soumission à l'étape 2) va permettre d'explorer la piste d'un actionneur hybride couplant un actionneur pneumatique et un frein magnéto-rhéologique en s'appuyant sur un modèle biomécanique obtenu à partir de mesures in situ pour reproduire la raideur des muscles dans le cas de certaines pathologies.

Une fois ces actionneurs mis en œuvre, une évaluation du geste réalisé doit être proposée. Pour cela, il est nécessaire de continuer à travailler sur l'analyse du geste pour la classification et la comparaison des gestes experts et novices en vue de leur évaluation. Des critères d'évaluation ont déjà été développés mais il faudrait les compléter afin de procéder à une évaluation objective et de proposer des pistes pour améliorer la courbe d'apprentissage (haptique supervisée par exemple).

Les prototypes développés peuvent aussi proposer des simulations multimodales en intégrant un modèle numérique des déformations des tissus et/ou des modalités d'imagerie médicale pour permettre aux praticiens de retrouver des repères proches de la salle d'opération. Les collaborations actuelles avec d'autres laboratoires, au niveau local (CREATIS, LIRIS, LaMCoS, CRNL), national (iCube, ISIR) ou international (University of Alberta, Universidad Nacional de Bogotá), doivent être poursuivies et étendues pour aller dans ce sens.

Dans cette perspective, le projet ANR RHU ICELAND va permettre de mettre un cadre officiel à la collaboration entre le LaMCoS et Ampère dans l'objectif de coupler une interface haptique et un modèle numérique biomécanique d'aorte.

Enfin, les collaborations industrielles doivent être développées pour permettre aux hôpitaux d'utiliser plus facilement nos prototypes. On pourra également s'appuyer sur les compétences des HCL pour promouvoir la formation des praticiens sur simulateur pédagogique haptique. Ce thème fait partie des consignes recommandés par la HAS (Haute Autorité en Santé) et correspond aux attentes de la future WHO academy qui va s'installer à Lyon en septembre 2023.

Bilan de l'activité

Projets : ANR Greenshield, Sparte (financé en partie par SAMSEI aux HCL), PeriSim (financé en partie par SAMSEI aux HCL)

Thèses en cours (1): Benjamin DELBOS (2021-2024)

Thèses Soutenues depuis 2019 (3): SENAC (25/10/2019), ALAMILLA DANIEL (12/03/2020), LICONA (12/03/2020)

Collaborations Universitaires : University of Alberta, HAPT-X (Arizona State University), LIRIS, LaMCoS, LIBM, CRNL INSERM, ISIR, Polytech Paris, Universidad Nacional de Bogotá, HCL (HFME).

Collaborations industrielles : start-ups Green Shield Technology, Paint'Up, Attom.

6. Conclusions et Perspectives

A l'instar de nombreuses structures de recherche en France ou à l'étranger qui associent quelques automaticiens à un groupe important de chercheurs se focalisant sur le composant et sa technologie, **l'originalité de notre approche est de mettre de fortes compétences en Automatique au service d'un domaine applicatif bien maîtrisé par quelques spécialistes.** C'est donc bien une approche globale au niveau "système" qui conduit nos développements.

Il va de pair qu'une autre originalité du département AIS est de posséder de fortes compétences sur toutes les **technologies de transmission de puissance, fluïdique, électrique et thermique, et donc de pouvoir avoir un œil objectif sur les problématiques d'efficacité et de gestion de l'énergie en lien avec les enjeux environnementaux.** La grande réussite du département est d'avoir pu attirer des **compétences théoriques en Automatique** et de les avoir intégrées dans cette **démarche d'interactions théorie-application** ce qui a permis de **mieux formaliser des problématiques génériques du point de vue de l'Automatique.**

La politique scientifique du département AIS pour les années à venir s'inscrit dans la **continuité des recherches développées** jusqu'à maintenant, c'est-à-dire se nourrir de l'interaction théorie-application en lien avec les **enjeux environnementaux, de l'énergie et de la santé.** Chaque thématique du département porte des objectifs scientifiques clairs et ambitieux qui s'appuient tous sur des **projets en relation avec le monde socio-économique.**

Certaines méthodologies développées par les chercheurs du département sont aujourd'hui suffisamment matures pour apporter des **solutions pertinentes à des problèmes concrets** ; par exemple, l'utilisation des approches robustes pour l'amélioration des performances de systèmes low-cost, la mise en œuvre de la commande LPV et l'analyse incrémentale pour la synthèse de correcteurs sur des systèmes non linéaires ou encore l'utilisation des transformations intégrales (Volterra ou Fredholm) afin de développer des capteurs logiciels pour les batteries ou les piles à combustibles. Ces **transferts technologiques** qui s'opèrent aujourd'hui à travers plusieurs projets au niveau national et européen, constituent de belles opportunités pour illustrer nos résultats plus théoriques. Il s'agira dans les prochaines années **de pérenniser ces relations et de rebondir sur les nouveaux problèmes** qui apparaîtront inévitablement.

A l'inverse, nous étudions **de nouvelles technologies** comme les machines sans terres-rares, les réseaux DC, l'hydraulique digitale, ou les actionneurs souples pour apporter des **solutions plus en phase avec les enjeux sociétaux.** Ceci implique de nouveaux problèmes et donc nécessite de **faire évoluer nos méthodologies** afin qu'elles répondent aux contraintes de ces nouvelles technologies.

Il faut enfin souligner 2 ruptures majeures dans nos travaux. L'une repose sur une **ouverture aux techniques de l'IA** en tant qu'outils pouvant être intégrés dans une démarche automatique pour traiter des problèmes d'identification, d'observation et de commande. La deuxième se propose d'aborder les problématiques de **la sûreté et de la sécurité des systèmes** au niveau de leur conception, de leur commande locale ou en réseau et de leur supervision.

L'activité du département restera donc très importante à court et moyen termes avec toujours cet équilibre entre théorie et application. Les interactions avec la communauté scientifique nationale et internationale doivent être entretenues, tout comme les collaborations au sein de consortiums associant universitaires et/ou industriels. Les moyens financiers dont dispose le département, sont conséquents et permettent d'investir dans des travaux amonts ou de nouveaux moyens d'essais.

Il existe néanmoins une pression en termes de ressources humaines. Tout d'abord, le renfort apporté par les 2 professeurs qui seront recrutés en 2022, sera très apprécié. Il faudra également envisager très rapidement un support technique plus important, de niveau ingénieur, afin de relayer et soulager les enseignants-chercheurs et chercheurs dans les phases de transfert technologique. Les chaires industrielles ainsi que les masters spécialisés sont des solutions à étudier pour répondre à ce problème. En outre, il faudra être attentif aux évolutions de carrière pour ne pas perdre certaines compétences. Enfin, il faut également nous rendre plus attractif pour le recrutement de chercheurs CNRS avec une implantation plus affichée au sein de l'INS2I et de la section 07 du CoNRS.

Membres du département AIS (2019-2022)

Prénom	Nom	Site	Fonction	Priorités				
				IES	TCEE	SENS	CEI	CISD
Mian Mohammad Arsalan	ASIF	INSA	Doctorant					X
Laurent	BAKO	ECL	MCF-HDR					X
Jérémy	BARRA	ECL	Doctorant					X
Amaury	BEAUDET	INSA	Doctorant			X		
Hamza	BENADADA	INSA	Doctorant					X
Eric	BIDEAUX	INSA	PR					X
Eric	BLANCO	ECL	MCF					X
Xavier	BOMBOIS	ECL	DR CNRS					X
Emmanuel	BOUTLEUX	ECL	MCF			X		X
Federico	BRIBIESCA-ARGOMEDO	INSA	MCF					X
Quentin	BRUEL	ECL	Doctorant				X	
Xavier	BRUN	INSA	PR		X			X
Giacomo	CASADEI	ECL	MCF					X
Rémi	CHALARD	INSA	MCF	X				
Louis	DASSONVILLE	INSA	Doctorant		X			
Justin	DARNET	INSA	Doctorant					X
Gabriel	DE CARVALHO FERREIRA	INSA	Doctorant					X
Benjamin	DELBOS	INSA	Doctorant	X				
Romain	DELPOUX	INSA	MCF-HDR		X			
Michaël	DI LORETO	INSA	MCF					X
Hugues	DORGERON	INSA	Tech					
Emil	DUMITRESCU	INSA	MCF			X		
Damien	EBERARD	INSA	MCF					X
Cédric	ESCUDERO	INSA	MCF			X		X
Hugo	FOURNIER	INSA	Doctorant					X
Jean-Yves	GAUTHIER	INSA	MCF		X			
Alaa	HIJAZI	INSA	MCF		X	X		
Julien	HUILLERY	ECL	MCF				X	X
Jacques	JOLY	INSA	IR CNRS					
Redouane	KANAZY	INSA	Doctorant					
Alexandre	KIRCHER	ECL	Doctorant					X
Anton	KORNIENKO	ECL	MCF-HDR				X	X
Koami	KPOTO	INSA	Doctorant			X		
Laurent	KRAHENBUHL	ECL	Emérite		X			
Vincent	LECHAPPE	INSA	MCF		X			
Arnaud	LELEVE	INSA	MCF-HDR	X				
Xuefang	LIN_SHI	INSA	PR		X			
Eva	MARKIEWICZ	ECL	Doctorant					X

Wilfrid	MARQUIS-FAVRE	INSA	PR					X
Paolo	MASSIONI	INSA	MCF-HDR					X
Lucas	MOLINA-BARROS	INSA	Doctorant			X		
Richard	MOREAU	INSA	MCF	X				
Halim	OULD-LAHSEM	ECL	Doctorant				X	
Cécile	PERNIN	ECL	Doctorant					X
Arthur	Perodou	ECL	ATER					
Minh Tu	PHAM	INSA	MCF-HDR	X	X			
Essolizam	PLANTE	INSA	Doctorant					X
Adrien	PREVOST	INSA	Doctorant		X			
Djahid	RABEHI	INSA	ATER		X			X
Antoine	SABRIE	INSA	Doctorant		X			
Fabricio	SAGGIN	ECL	Doctorant					X
Laurent	SCHULLER	INSA	Doctorant		X			
Gérard	SCORLETTI	ECL	PR				X	X
Sylvie	SESMAT	INSA	IR					
Tanguy	SIMON	INSA	Doctorant		X			
Mohamed	SMAOUI	INSA	MCF					X
<i>Daniel</i>	<i>THOMASSET</i>	<i>INSA</i>	<i>Emérite</i>					X
Laetitia	TOSONI	INSA	Doctorant					X
Jean-François	TREGOUET	INSA	MCF		X			X
Xiaokang	ZHANG	INSA	Doctorant		X			
Tahereh	VAEZI	INSA	Doctorant					X
Eric	ZAMAI	INSA	PR			X		

Liste des thèses (2019-2022)

Nom	Prénom	Date de debut	Date de fin (si soutenue)	Financement	Titre de la these
MEZNI	Anis	2015	13/05/2019	Thèse Tunisie	Automatic generation of wireless sensor networks scheduling
WANG	Peng	17/02/2016	16/02/2019	China scholarship council	Active vibration control in a specific zone of smart structures
PERODOU	Arthur	14/4/2016	18/12/2019	Région ARC6	Frequency design of passive Electronic Filters : a Modern System Approach
JAKOBSEN	Sigurd	01/09/2016	31/10/2019	NTNU (Trondheim Norvège)	Frequency control and stability requirements on hydro power plants.
SENAC	Thibault	01/10/2016	25/10/2019	Contrat doctoral	PeriSIM : Développement d'un simulateur d'apprentissage d'un geste d'anesthésiste : la périurale
KREISS	Jérémie	03/10/2016	6/12/2019	Contrat doctoral	Allocation de commande pour l'électrotechnique et l'électronique de puissance
MARIETTE	Kevin	01/03/2017	9/11/2020	ANR ACTIV'ROAD	Contrôle en boucle fermée pour la réduction active de traînée aérodynamique des véhicules
LICONA RODRIGUEZ	Angel Ricardo	07/03/2017	12/03/2020	Bourse CONACYT (Mexique)	Collaborative Hands- on Training on Haptic Simulators
ALAMILLA DANIEL	Ma de Los Angeles	07/03/2017	12/03/2020	Bourse CONACYT (Mexique)	Development of a haptic simulator for practicing the intraarticular needle injection under echography
XU	Changyi	01/09/2017	16/12/2020	China scholarship council	Operational dependability model generation
VAEZI	Tahereh	01/09/2017		Contrat doctoral	Position or force trajectory tracking under large disturbances of a servovalve/pump controlled hydraulic actuator
LAUZIER	Kévin	04/09/2017	18/9/2020	CIFRE - Air Liquide	Analyse et réduction des vibrations d'un refroidisseur cryogénique pour application spatiale : de la modélisation multiphysique à la commande non-linéaire
COLIN	Kévin	01/10/2017	17/09/2020	Projet Next4Mems	Data informativity for the Prediction Error Identification of MIMO Systems. Identification of a MEMS gyroscope
KIRCHER	Alexandre	01/10/2017	15/06/2021	Contrat doctoral	Design and Analysis of Resilient state estimators for Linear Discrete-time systems
STECKLER	Pierre-Baptiste	02/10/2017	22/09/2020	Super Grid Institute	Contribution à la conversion AC/DC en Haute Tension
SAGGIN	Fabricio	13/10/2017	13/09/2021	Projet Next4Mems	Robust Control for MEMS Gyroscopes
AYALA-CUEVAS	Jorge	13/10/2017	07/12/2021	Projet Next4Mems	Performance validation of MEMS Gyroscopes using Uncertain and Time-Varying Models
MORELLI	Federico	01/11/2017	27/01/2021	Projet Next4Mems	Optimal identification experiment design: contributions to its robustification and to its use for dynamic network identification. Resonance frequency tracking
ZHANG	Xiaokang	01/10/2018	24/03/2022	China scholarship council	Multi-functional converter for three-phase motor drives: modeling, analysis and fault-tolerant control
BARRA	Jérémy	31/10/2018	20/01/2022	CEA	Estimation embarquée du mouvement sans informations d'infrastructure : application à un drone autonome
BRUEL	Quentin	31/10/2018		CEA	Apprentissage profond de grille d'occupation pour la navigation autonome
HUIN	Xavier	01/11/2018	04/12/2021	CIFRE Volvo	Optimisation du dimensionnement de la chaîne cinématique d'un véhicule commercial hybride rechargeable opérant dans des zones zéro-émission
NDOYE	Aboubacar	01/12/2018	07/12/2021	Contrat doctoral	Contribution à la commande robuste de systèmes à relais et sa mise en œuvre expérimentale : Application aux convertisseurs de puissance DC-DC.
UICICH	Simon	15/3/2019		CIFRE - Airbus	Etude de nouvelles topologies et de nouveaux contrôles d'alimentation à découpage pour l'aéronautique

PODLASKI	Meaghan	01/08/2019		Bourse Chateaubriand	Modeling, Estimation and Control for Cyber-Physical Systems
SIMON	Tanguy	30/9/2019		Contrat doctoral, enjeu Energie INSA	Commande des convertisseurs pour les micro-réseaux-DC maillés
SCHULLER	Laurent	01/10/2019		Contrat doctoral, enjeu Transport INSA	Commande d'une nouvelle génération de moteur pour le véhicule électrique
MARKIEWICZ	Eva	21/10/2019		Contrat doctoral	Commande décentralisée : application au contrôle des vibrations
MOLINA-BARROS	Lucas	01/11/2019		Super Grid Institute	Modal approach for the supervisory control of reconfigurable HVDC grids
DASSONVILLE	Louis	01/02/2020		CIFRE - Keepmotion	Proposition d'une commande décentralisée pour machines multi phases à bobinage ouvert avec prise en compte des variations des paramètres de la machine et optimisation des modes dégradés
TOSONI	Laetitia	01/04/2020		CIFRE - Thales	Observateurs de transfert d'alignement statique et dynamique d'antennes satellite mobiles
FOURNIER	Hugo	21/04/2020		CIFRE - Airbus	Commande référencée données pour ailes souples et très souples
BEAUDET	Amaury	01/05/2020		DGA-CNRS	Cybersécurité des systèmes de contrôle-commande des infrastructures industrielles : étude des failles issues des spécifications des contraintes de commandes pour la mise en place de mécanismes de détection d'attaques
ASIF	Mian Mohammad Arsalan	01/09/2020		Projet Européen, INSTABAT	Développement de capteurs virtuels électrochimiques pour batteries de Lithium ion
PLANTE	Essolizam	01/10/2020		Bourse CEA	Méthodes de pré-dimensionnement des systèmes hybrides multi-sources avec loi de commande intégrée
DE CARVALHO FERREIRA	Gabriel	01/10/2020		CIFRE - Liebherr	Méthodologie d'aide à la conception robuste et au monitoring de circuits de prélèvement d'air pour l'aéronautique
SABRIE	Antoine	01/10/2020		IFPEN	Modélisation de la limitation en tension des onduleurs de traction et exploration d'une topologie de puissance pour la réduire
DELBOS	Benjamin	01/09/2021		Contrat doctoral, enjeu Santé INSA	Conception d'un simulateur pour la ponction ventriculaire
METTALI	Hamza	01/09/2021		Projet Carnot Inter-Labo CORRES	Optimisation sous incertitude de la conception de réseaux de chaleur de nouvelle génération
DARNET	Justin	01/10/2021		CIFRE Poclair	Optimisation et Commande d'un moteur hydraulique digital
OULD-LAHSEM	Halim	01/10/2021		Contrat doctoral	Compromis Energie-Information pour le control de vibrations
PREVOST	Adrien	01/10/2021		Contrat doctoral, enjeu Energie INSA	Pilotage vectoriel de machines électriques à forces électromotrices non-sinusoidales
BENADADA	Hamza	15/11/2021		Chaire VOLVO INSA	Observateurs avancés pour l'amélioration de la tenue de route et la récupération d'énergie
PERNIN	Cécile	07/12/2021		CIFRE Tronics	Commande robuste pour un capteur inertiel résonant MEMS auto-oscillant et paramètres variant
NGUYEN	Dinh Duy Kha	01/02/2022		PSPC RAILMON	Detection of cyberattacks in railway's remote monitoring systems
UWADUKUNZE	Alain	01/02/2022		thèse financée par l'ISL	Artificial intelligence techniques for aerodynamics and optimized steering
ABDELAOUI	Sara	21/03/2022		PSPC RAILMON	Model-based aggregation and inference of malicious intent in railwys remote monitoring systems