

DOSSIER UNIQUE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE PAR LE MINISTÈRE ET D'ASSOCIATION AU CNRS

Contractualisation vague D 2010-2013

Laboratoire des signaux et systèmes (UMR 8506)

PROJET



Table des matières

Organigramme	5
Pyramide des âges	7
Introduction	11
1 Division Signaux	13
1.1 Modélisation statistique du signal	13
1.2 Groupe Problèmes Inverses	17
1.3 Systèmes de télécommunications	19
1.3.1 Théorie de l'information et codage pour les réseaux	19
1.3.2 Conception/optimisation inter-couches	20
1.3.3 Coopération ou compétition dans les réseaux sans fil	21
1.3.4 Couche physique et outils mathématiques avancés	23
1.3.5 Conclusion	24
2 Division Systèmes	25
2.1 Axes Méthodologiques	25
2.1.1 L'automatique au delà de la commande de processus (E. Walter)	25
2.1.2 Systèmes échantillonnés (D. Normand-Cyrot)	26
2.1.3 Estimation, commande non linéaire et commande adaptative des systèmes pPhysiques (R. Ortega, F. Lamnabhi-Lagarrique, E. Panteley)	26
2.1.4 Retards, dynamiques et interconnexions (S. Niculescu)	27
2.1.5 Commande de systèmes non linéaires (Y. Chitour)	27
2.1.6 Synchronisation des systèmes (A. Loria)	27
2.1.7 Théorie algébro-différentielle des problèmes d'observation (S. Diop)	28
2.2 Axes Applicatifs	28
2.2.1 Caractérisation du contact électrique soumis au <i>fretting</i> (S. Tliba, W. Pasillas-Lépine)	28
2.2.2 Stabilité transitoire des réseaux de puissance (R. Ortega, F. Lamnabhi-Lagarrique)	28
2.2.3 Systèmes de direction innovants (W. Pasillas-Lépine)	29
2.2.4 Observation et contrôle du drone IBISC (W. Pasillas-Lépine, F. Lamnabhi-Lagarrique)	29
2.2.5 Modélisation en biologie (B. Laroche)	30
2.2.6 Modélisation et estimation de la digestion anaérobie (S. Diop)	30
2.2.7 Synchronisation et désynchronisation neuronales (E. Panteley, W. Pasillas-Lépine, F. Lamnabhi-Lagarrique)	30
2.2.8 Contrôle actif des vibrations (S. Tliba)	31
2.2.9 Caractérisation de BioMEMS : projet Novéo (S. Tliba)	31
2.2.10 Au cœur de la pile à combustible : défis et méthodes (F. Lamnabhi-Lagarrique, R. Ortega)	31
2.2.11 Méthodes mathématiques pour la planification de trajectoires (Y. Chitour)	32
2.3 Actions fédératrices	32
2.3.1 EECI – European Embedded Control Institute	32
2.3.2 AML - STIC & A	33
3 Département de Recherche en Electromagnétisme	35
3.1 Systèmes rayonnants complexes	36
3.1.1 Antennes : montée en fréquence des applications	36
3.1.2 Dosimétrie : intérêt pour les très basses fréquences	36
3.2 Compatibilité électromagnétique	37
3.2.1 La compatibilité des systèmes de radiocommunication aéronautiques	37
3.2.2 Vers de nouvelles applications pour les chambres réverbérantes	37

3.3	Problèmes inverses des ondes	38
3.3.1	Le contexte coopératif	38
3.3.2	Les objectifs et les points clés	39
	Publications du L2S pendant la période de référence	41

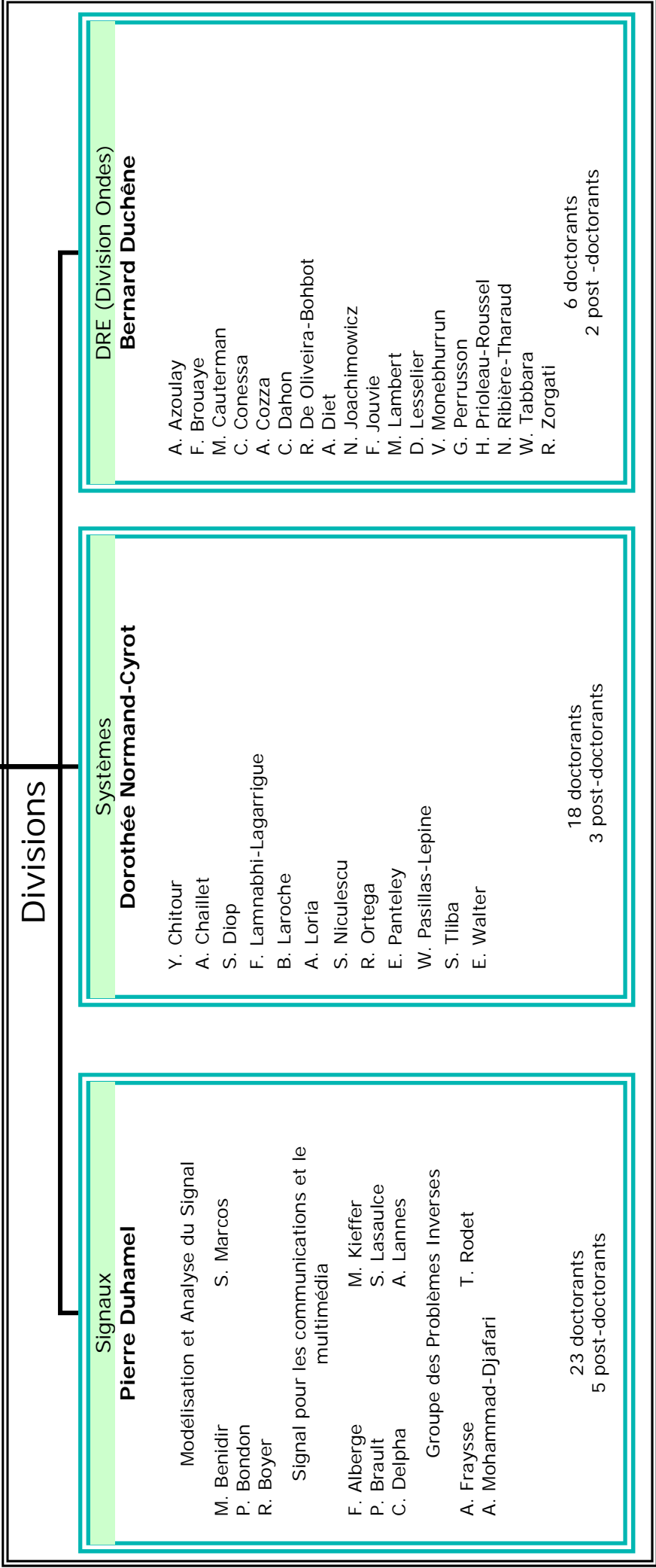
Organigramme du Laboratoire des Signaux et Systèmes

Directeur
Eric Walter

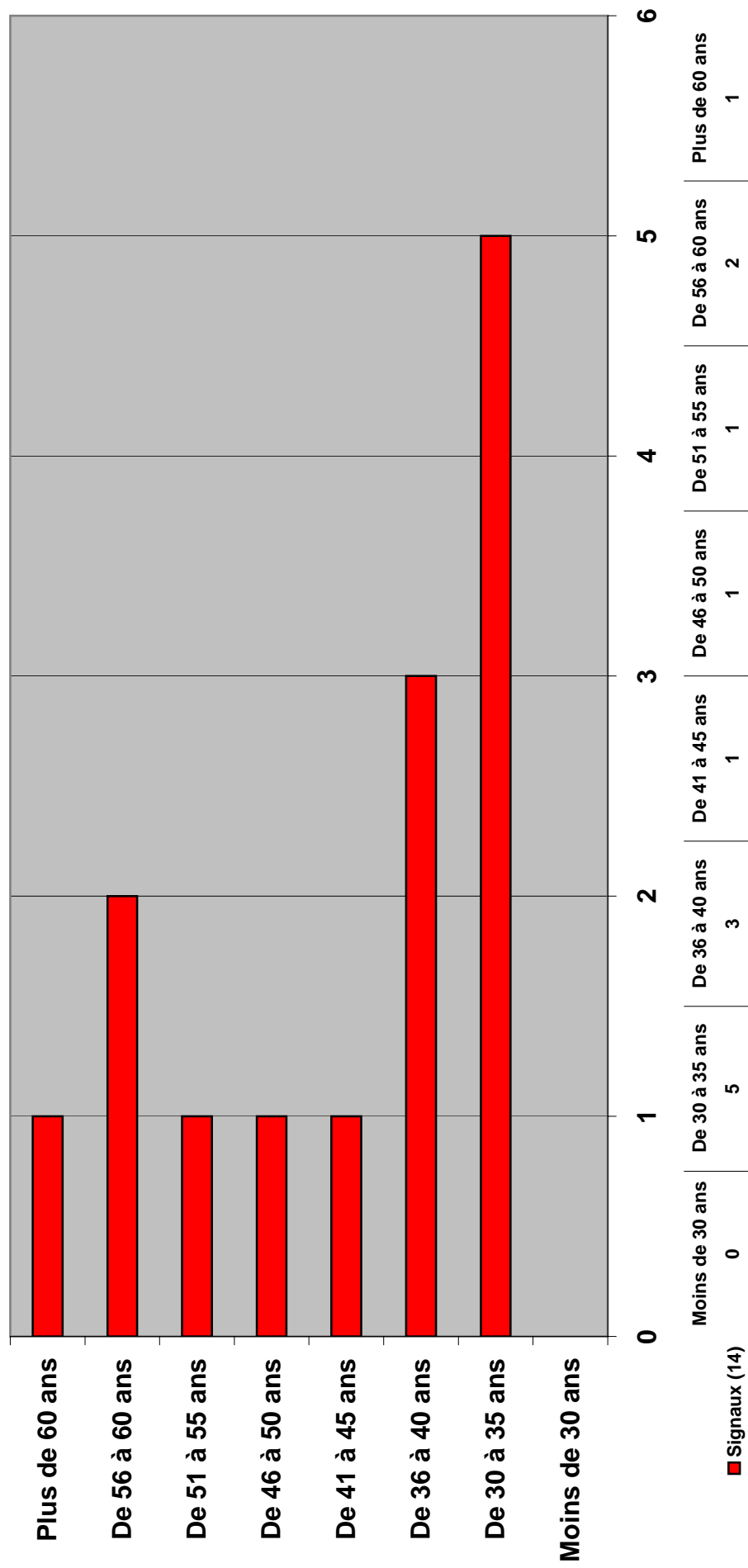
Conseil de laboratoire
15 membres, 6 nommés, 8 élus, 1 membre de droit

Informatique
F. Desprez
J. Strub

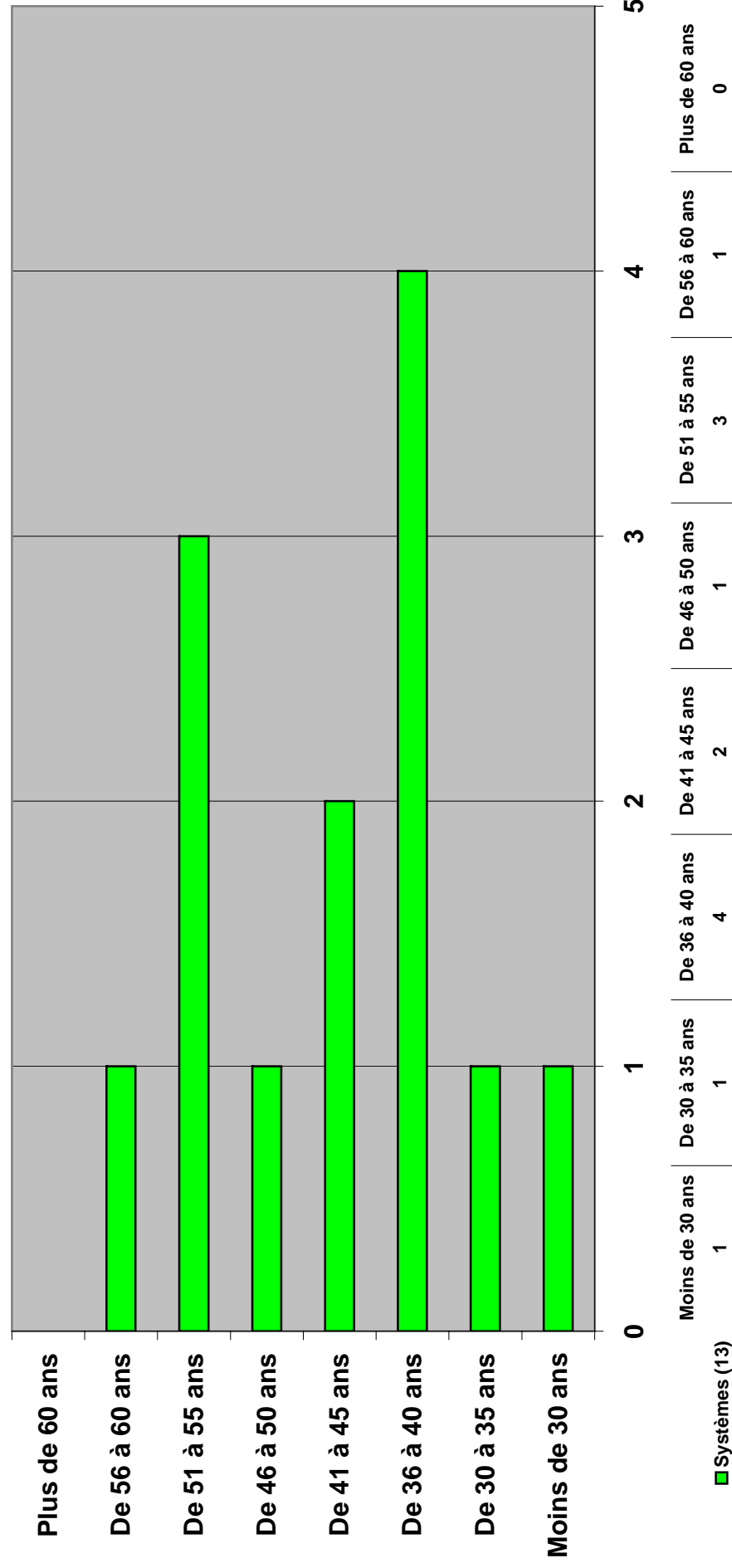
Administration
Administrateur
H. Pieranska
Communication
M. Baverel
Secrétariat & Gestion
M. Giron
F. Guimonet
D. Rouet
ACMO
C. Conessa



Division Signaux
Année 2008
(Moyenne d'âge : 42 ans)



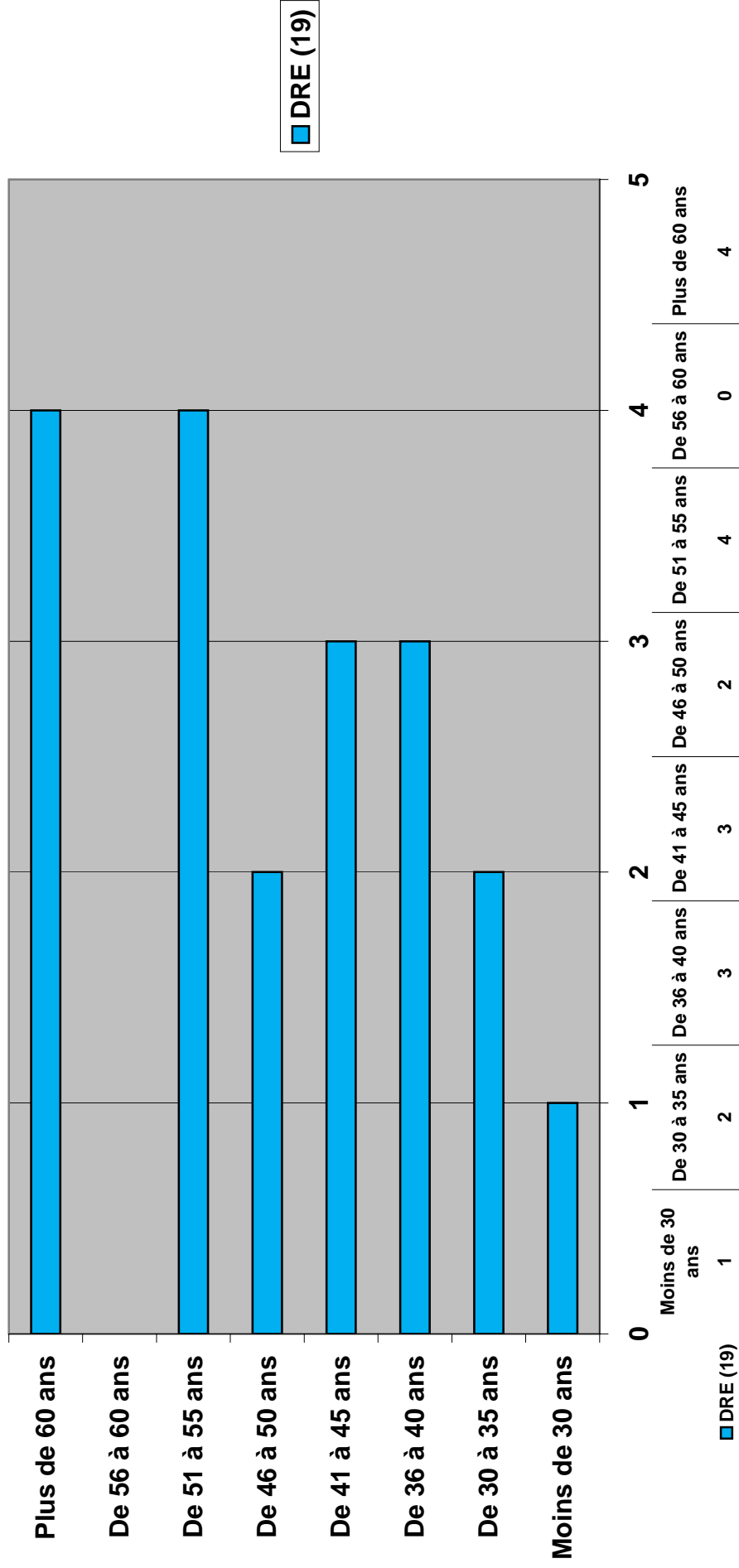
Division Systèmes
 Année 2008
 (Moyenne d'âge : 46 ans)



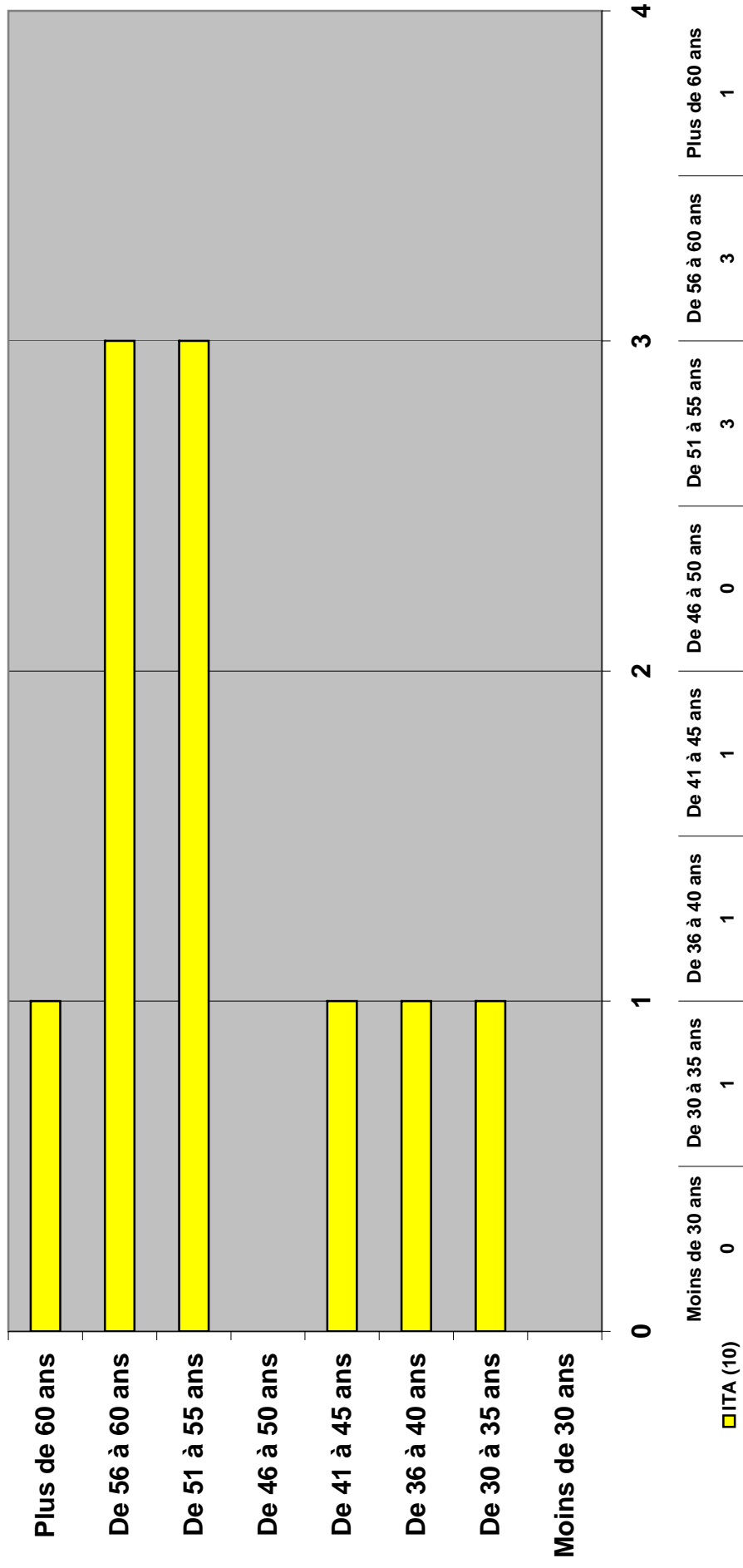
■ Systèmes (13)

NB : parmi les personnes comptabilisées dans ce graphique, une validera ses droits à la retraite et deux nous quitteront pour un laboratoire de l'université Pierre et Marie Curie.

DRE
Année 2008
(Moyenne d'âge : 47 ans)



Personnel ITA
Année 2008
(Moyenne d'âge : 51 ans)



Introduction

Le quadriennal 2006 - 2009 a été caractérisé par la mise en place de nombreuses opérations de mise en réseaux dans lesquelles le L2S se trouve impliqué. Citons notamment le RTRA Digiteo, le pôle de compétitivité SYSTEM@TIC, l'Institut Carnot C3S (Centrale Supélec, Sciences des Systèmes), le PRES UniverSud Paris, et le *European Embedded Control Institute*. Chacune de ces opérations a et aura un impact sur la façon dont le L2S conduit ses recherches. La charte de l'Institut Carnot, par exemple, nous impose un professionnalisme bienvenu dans nos relations partenariales. Le RTRA Digiteo, grâce aux moyens significatifs qui lui ont été attribués, a fait basculer les laboratoires qui le composent d'une tradition du chacun pour soi à une logique de coopération qui constitue une petite révolution.

Peut-on dire pour autant que tous les obstacles à la coopération entre les acteurs de la recherche du Plateau de Saclay (pris au sens large) ont disparu ? Certainement pas, et les problèmes posés par exemple par la propriété intellectuelle des résultats sont loin d'avoir trouvé une solution simple, mais jamais les conditions n'ont été aussi favorables au montage de projets multi laboratoires.

Le L2S continuera donc à encourager les coopérations entre acteurs aux compétences complémentaires. Cela veut dire en particulier favoriser les coopérations entre divisions du L2S, entre le L2S, le LGEP et les équipes propres de Supélec (avec le projet en cours de montage d'une fédération de recherche) et entre les laboratoires de Digiteo.

Les coopérations ne sont fructueuses et durables que si chacun génère des compétences et des idées à apporter au pot commun. Il est donc indispensable que les petits groupes de chercheurs qui constituent les composantes du L2S puissent continuer à conduire et nourrir une réflexion qui leur soit propre. C'est sur cet équilibre entre réflexion interne et collaborations avec l'extérieur que doit reposer le développement du laboratoire sur le long terme. Le L2S compte donc continuer à assurer à chaque groupe un financement de base lui permettant de conduire des recherches sur fonds propres tout en encourageant la réponse à des appels d'offre, la recherche partenariale et les collaborations académiques quand elles sont cohérentes avec nos objectifs à moyen terme.

Le plus gros défi que nous aurons à relever nous semble être la diminution très rapide du nombre des étudiants de qualité intéressés par la préparation d'une thèse. Si l'on se souvient que les doctorants représentent à peu près la moitié du personnel de recherche du laboratoire, on mesure à quel point il est important de tout faire pour redresser la situation en sensibilisant les jeunes générations d'ingénieurs et de masters à l'intérêt de la préparation d'une thèse.

Un autre problème très important qu'il faudra résoudre, et pour lequel nous espérons le soutien de nos tutelles, est le maintien de nos capacités opérationnelles malgré des départs de chercheurs, d'enseignants chercheurs et d'ITA (départs à la retraite, promotions externes, mobilité NOEMI) dont nous commençons déjà à sentir les effets.

Nous avons choisi de présenter nos perspectives de recherche en respectant la structure par division qui est la nôtre depuis la création du laboratoire. Ceci ne doit pas masquer une ouverture de ces divisions sur le monde extérieur qui n'a probablement jamais été aussi grande.

Chapitre 1

Division Signaux

La structuration en groupes de la division est stable depuis de nombreuses années : *Modélisation*, *Problèmes inverses*, et *Systèmes de télécommunications* sont les trois thèmes mis en avant. On notera cependant la forte évolution des thèmes qui se cachent derrière ces mots, d'un contrat quadriennal à l'autre, ce qui montre une réactivité importante des membres de la division, aidés en cela par l'arrivée de nouveaux permanents. Il s'agit là d'une force évidente. Cette évolution a été l'occasion d'un rééquilibrage du groupe *Télécoms*, qui commençait à devenir très important, vers le groupe *Modélisation* (mouvement d'un DR, S. Marcos, et de 50 % d'un MdC, R. Boyer), alors que le groupe *Modélisation* bénéficiait de plus de l'arrivée d'un jeune MdC, A. Renaux. Dans le même temps, A. Fraysse (MdC Univ Paris-Sud) nous a rejoint, ainsi que P. Brault (IR CNRS), tous deux dans le groupe *Télécoms*.

La division Signaux connaît cependant des menaces. Les départs y sont en effet nombreux ponctuellement, pour des raisons conjoncturelles. Depuis quelques années en effet, ses membres fondateurs prennent leur retraite : O. Macchi était partie lors de la rédaction de notre précédent quadriennal, B. Picinbono, bien que toujours actif, ne fait plus officiellement partie du personnel, et G. Demoment prend sa retraite. De plus, comme dans tout laboratoire actif, de jeunes Maîtres de Conférences efficaces passent leur HdR, et sont promus Professeurs dans d'autres universités. C'est le cas cette année de J.-F. Giovannelli, et M. Kieffer, récent HdR, pourrait bientôt bénéficier d'une même promotion. Les conséquences de cette situation sont déjà majeures pour le Groupe *Problèmes inverses*, puisque deux de ses membres permanents (sur quatre) le quittent.

Cette menace peut en même temps être une occasion, puisque deux postes, l'un de Professeur l'autre de Maître de Conférences seront a priori attribués à la division. Ce sera à nous de sélectionner les candidats qui nous permettront de développer nos activités le plus harmonieusement possible.

1.1 Modélisation statistique du signal

L'équipe est maintenant constituée de sept membres permanents (3 DR, 2 PU, 2 MdC) alors que durant le précédent quadriennal, elle était composée de 2 DR et 2 PU. A part le recrutement d'un MdC, cette augmentation correspond à des mouvements internes au laboratoire. Une nouvelle thématique apparaît dans notre équipe (*Signaux multi-capteurs*) sans changer notre identité qui reste fondée sur le développement et l'utilisation d'outils statistiques pour l'analyse des signaux.

Nous encadrons actuellement six doctorants et entretenons des collaborations académiques notamment avec l'université libre de Bruxelles, l'université catholique de Santiago du Chili, l'université catholique de Louvain, l'université Jean Monnet de Saint-Étienne, l'université Washington à Saint Louis, l'ENS Cachan, l'ENST-Paris, l'ENSEA, le laboratoire Sondra et Supélec, et des collaborations industrielles avec l'office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français (RTE), et l'entreprise Renault.

Processus ponctuels et optique statistique (C. Bendjaballah)

La plupart des travaux consacrés à l'étude des processus ponctuels (PP) sont essentiellement théoriques. Aussi lorsque la théorie est difficile à élaborer, une simulation sur ordinateur semble être une approche satisfaisante du PP. Ainsi, nous avons récemment prouvé l'intérêt pour l'étude des PP de la simulation d'intervalles entre points successifs du PP. Ce PP est défini comme une suite de variables aléatoires (VA) positives. Ces VAs sont générées à partir de processus auto-régressifs (AR).

De nombreuses simulations nous ont permis d'analyser la fonction de coïncidence de la densité du PP, qu'il faut bien distinguer de la fonction de corrélation, et de montrer son importance dans l'interprétation des expériences d'optique statistique.

Pour les prochaines années, nous envisageons de poursuivre cette étude :

- en considérant la réciproque du résultat suivant établi dans un travail précédent : un champ classique a pour processus de détection un PP de Poisson composé présentant des propriétés de groupement ;

- en diversifiant les processus AR ;
- en généralisant les PPs à deux intervalles disjoints.

Nous essaierons également d’expliquer les phénomènes d’antigroupement observés dans les PPs qui ne sont pas de Poisson composé, par le traitement quantique des PPs dans un espace de dimension finie.

Analyse en composantes parcimonieuses (M. Benidir)

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse de O. Fourt (juin 2008) intitulée « Traitement des Signaux à Phase Polynomiale (SPP) dans des environnements fortement bruités : séparation et estimation des paramètres », ont permis d’obtenir des résultats empiriques sur la rapidité et la robustesse à la nature du bruit pour un certain nombre d’algorithmes. Ces travaux fondés sur des simulations en très grande partie ont porté essentiellement sur l’estimation et la séparation de SPP à l’aide d’algorithmes (SCA : Sparse Component Analysis) déduits de l’analyse en composantes parcimonieuses. Suite aux résultats obtenus, deux points nous semblent mériter des développements futurs qui constitueront les deux axes de recherche suivants pendant les quatre années à venir.

Séparation de mélanges bruités de signaux à l’aide d’algorithmes SCA. Dans cet axe de recherche, les questions suivantes seront traitées.

- Étude de l’évolution des performances des algorithmes SCA en fonction du choix du seuillage, de la longueur des signaux et du bruit dans le cas où la décomposition des signaux est faite sur des paquets de cosinus locaux.
- Choix d’autres méthodes de seuillage et étude statistique des performances.
- Comparaison des résultats obtenus en considérant une décomposition des signaux sur des paquets de cosinus locaux et une transformation qui permet une plus grande parcimonie, la première à considérer étant l’analyse en *chirplets*.
- Extension des algorithmes obtenus à des classes de signaux non stationnaires autres que les SPP (signaux de parole par exemple).

Algorithmes rapides d’estimation des paramètres d’un SPP bruité. L’objectif n’est pas d’utiliser les distributions d’analyse temps-fréquence qui sont des méthodes de traitement assez lourdes et donnant de bonnes résolutions mais de reprendre des algorithmes rapides que nous avons considérés récemment pour estimer les paramètres d’un SPP. Ces algorithmes d’estimation de l’amplitude et de la phase d’un SPP sont fondés sur une régression portant sur la fréquence instantanée du signal. Pour compléter la démarche empirique adoptée dans les travaux de thèse d’O. Fourt, les questions suivantes seront traitées dans ce deuxième axe de recherche.

- Étude de l’évolution des performances en fonction de la longueur du signal et des dimensions du filtre de lissage. Calcul/modélisations/approximations des bornes.
- Recherche d’un algorithme d’estimation de la fréquence instantanée qui soit plus robuste en terme de résistance à la puissance du bruit sans trop perdre en rapidité.
- Comparaison éventuelle de la décomposition modale empirique et de certaines transformées de spectre évolutif.

Séries chronologiques (P. Bondon)

Les recherches sur les séries chronologiques impliquent trois doctorants. Nos travaux porteront sur la prédiction de processus à mémoire longue, le filtrage particulière, l’estimation robuste de modèles linéaires, et la modélisation du trafic dans des réseaux. Nous entretenons des collaborations académiques avec l’université catholique de Santiago du Chili et des collaborations industrielles avec le gestionnaire du réseau de transport d’électricité français (RTE), filiale du groupe EDF.

Prédiction de processus à mémoire longue. Ces séries apparaissent dans de nombreux domaines comme l’hydrologie, l’économie ou le télé-traffic informatique, et sont caractérisées par des covariances qui tendent vers zéro hyperboliquement si lentement que leur somme diverge. Dans le domaine fréquentiel, la longue dépendance correspond à une densité spectrale tendant vers l’infini à l’origine. L’un des modèles paramétriques de processus à longue dépendance les plus couramment utilisés est le modèle autorégressif à moyenne mobile fractionnaire (AR-FIMA). Le problème de l’estimation de modèles paramétriques ou semi-paramétriques pour des processus à mémoire longue a été beaucoup étudié ces quinze dernières années. En revanche, le problème de la prédiction reste largement inexploré bien que posant un certain nombre de difficultés pratiques et théoriques inhérentes à la longue dépendance. Tout d’abord, comme en pratique les échantillons disponibles sont en nombre fini, le passé du processus est nécessairement tronqué. Pour des processus à mémoire courte, cette troncature peut ne pas affecter trop sensiblement la qualité de la prédiction dans la mesure où l’influence d’une donnée éloignée dans le passé est négligeable car les covariances tendent vers zéro exponentiellement. À l’inverse pour un processus à mémoire longue, les covariances tendant plus lentement vers zéro, l’effet de données distantes dans le passé peut être important et on peut s’attendre à une différence importante entre le prédicteur à passé infini et un prédicteur à passé fini. Ensuite, le calcul du prédicteur linéaire optimal est complexe du point de vue numérique. En effet, si la complexité du calcul du prédicteur est proportionnelle à la taille du passé pour un processus à mémoire courte de type ARMA, pour un processus à mémoire longue, elle est proportionnelle au carré de la taille du passé. De plus le calcul des covariances du processus est coûteux dans le cas d’un processus ARFIMA puisqu’il faut évaluer la fonction hypergéométrique

gaussienne. Pour ces raisons, il peut être intéressant de considérer un prédicteur sous-optimal obtenu par troncation du prédicteur linéaire optimal à passé infini et d'étudier la qualité de ce prédicteur, c'est à dire la vitesse et le mode de convergence vers zéro du reste de la série. Dans le cadre d'une collaboration académique avec le Chili, nous avons déjà étudié la vitesse de convergence en moyenne quadratique. Nous envisageons dans le futur d'étendre et de compléter ce résultat en étudiant notamment les points suivants :

- Théorème de la limite centrale pour le reste de la série. Nous espérons montrer la convergence à la vitesse standard vers une loi normale, ce qui permettra de définir des intervalles de confiance.
- Cas de processus à mémoire intermédiaire, comme le modèle ARFIMA avec un paramètre de longue mémoire négatif. Dans ce contexte, les paramètres autorégressifs ne sont pas sommables ce qui complique beaucoup l'analyse. En particulier, il n'est pas évident que la vitesse de convergence en moyenne quadratique soit la même que pour un processus à mémoire longue.
- Cas de processus ARFIMA généralisés (modèle ARFIMA saisonnier, modèle de Gegenbauer à k -facteurs). La difficulté est que la densité spectrale admet des pôles et des zéros à plusieurs fréquences ce qui introduit plusieurs paramètres de longue mémoire.
- Problème statistique où les paramètres autorégressifs dépendent de paramètres inconnus estimés en fonction des données.

Filtrage particulière. Le travail de thèse de Qi Cheng sur le filtrage particulière pour des systèmes dynamiques non linéaires sera complété en proposant un nouveau filtre UPF (*unscented particle filter*) itéré qui surpasse le filtrage particulière classique, le filtrage IUKF (*iterated unscented Kalman filter*), ainsi que le filtrage IEKF (*iterated extended Kalman filter*) lorsque le bruit d'observation est de variance faible.

Estimation robuste de modèles de consommation d'électricité. La thèse de Y. Chakhchouk porte sur l'estimation robuste de modèles de consommation d'électricité pour la prévision à court terme, en collaboration avec RTE. RTE a mis au point un modèle paramétrique de la consommation de type ARMA intégré saisonnier (SARIMA). Les paramètres de ce modèle sont actuellement estimés par une méthode de moindres carrés qui n'est pas robuste vis-à-vis de données aberrantes. Nous avons fait une synthèse des méthodes robustes existantes et nous avons récemment mis au point une méthode utilisant des médianes. Le travail futur consistera à tester notre approche sur des séries réelles de consommation électrique et à établir les propriétés asymptotiques de notre estimateur.

Analyse et prédiction du trafic dans des réseaux. Dans le cadre de la thèse de Li Song sur l'analyse du trafic dans des réseaux informatiques, nous avons mis au point un modèle de série chronologique non stationnaire à longue dépendance. Ce modèle est un processus ARFIMA par morceaux offrant une modélisation très flexible. Il faudra étudier l'estimation statistique des points de ruptures et des paramètres ainsi que l'adéquation de ce modèle à des séries réelles.

Signaux multi-capteurs (R. Boyer, S. Marcos et A. Renaux)

A l'occasion du recrutement d'A. Renaux sur un poste de Mdc à l'Université Paris-Sud en octobre 2007, un rapprochement autour de la thématique du traitement statistique des signaux multi-capteurs incluant S. Marcos, R. Boyer et A. Renaux s'est mis en place au sein de l'équipe *Modélisation statistique du signal*.

Le concept de systèmes multi-capteurs (multi-entrées / multi-sorties) tend à se développer afin d'utiliser judicieusement les degrés de liberté supplémentaires apportés par des informations multiples dans le but de réduire l'incertitude sur l'information résultante. Déjà utilisés dans les domaines de la téléphonie mobile, de l'internet (réseaux WiFi) et de la localisation (GPS), les systèmes multi-capteurs s'ouvrent à d'autres domaines tels que l'imagerie médicale, l'aéronautique et le nucléaire (déploiement d'une constellation de robots en milieu hostile).

Nous proposons d'utiliser les degrés de liberté naturels des systèmes multi-capteurs, à savoir les diversités temporelles et spatiales, mais surtout la diversité des formes d'ondes et la possible mobilité du réseau de capteurs afin d'augmenter les performances des systèmes actuels. Ces deux derniers points font actuellement l'objet de recherches intensives de par le monde du fait de leur potentiel pour l'amélioration des systèmes multi-capteurs du futur.

Cette recherche débutera dans le cadre d'un projet Digiteo associant le L2S et l'École Normale Supérieure de Cachan au travers du Professeur P. Larzabal. Elle se traduira par la préparation de trois thèses.

- La première thèse, qui débute cette année, concernera l'étude des systèmes multi-capteurs embarqués, c'est-à-dire d'une constellation de capteurs mobiles coopérant pour une meilleure surveillance et une meilleure connaissance de l'environnement. Par exemple, une batterie de robots mobiles évoluant dans un milieu radio-actif et disposant chacun d'un système radar peut ainsi collaborer pour une meilleure localisation/détection des sources radioactives. Le principal avantage d'un tel type de système est qu'il est possible d'invoquer la mobilité des différentes plate-formes pour augmenter de manière significative les performances globales du système en termes de détection, de localisation, de poursuite et d'identification des cibles. De plus, le positionnement des capteurs et donc la modification de la géométrie de l'antenne doit pouvoir se faire de manière adaptative pour parer aux changements de l'environnement. Cette thèse concernera la conception d'algorithmes pour le placement optimal d'un réseau de capteurs. Ceci nous permettra d'obtenir des critères optimaux en terme d'erreur quadratique moyenne, c'est-à-dire qui conduiront à une meilleure estimation des paramètres physiques

des cibles (distance, vitesse, position, etc.) pour la localisation, la poursuite et l'identification.

- La deuxième thèse, qui débute aussi cette année, consistera à étudier le concept de sondage de canal MIMO (*multiple-input multiple-output*). On considèrera le modèle bidirectionnel MIMO paramétré par un nombre fini de trajets, chacun caractérisé par une direction de départ, une direction d'arrivée, un temps d'arrivée, un décalage Doppler et une atténuation de canal. Notre objectif est de proposer des algorithmes d'estimation de ces paramètres qui soient efficaces en termes de complexité calculatoire, notamment en exploitant des techniques modernes de traitement du signal issues de l'analyse multi-tableaux qui généralise le concept de matrice (tenseurs). Les algorithmes d'estimation envisagés devront tenir compte à la fois des erreurs de modèles (propagation, réception) et d'un environnement éventuellement non gaussien.
- Enfin, à partir de septembre 2009, nous étudierons au travers d'une troisième thèse l'utilisation de nouvelles formes d'onde de type télécommunications afin de tirer parti de la richesse qu'elles peuvent apporter. On peut citer par exemple l'étalement de spectre, l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ou encore le codage spatio-temporel. Les caractéristiques non-circulaires que procurent certaines formes d'ondes de communications, ou encore leur cyclostationnarité seront exploitées, tant pour la définition des ondes émises que pour les traitements associés. Dans le contexte de radar MIMO (multistatique et polarimétrique), l'objectif de ce travail sera une bonne détection/localisation/reconnaissance des cibles. Les algorithmes correspondants seront développés et des critères de sélection des formes d'ondes ou de certains de leur paramètres seront proposés afin d'améliorer les performances d'estimation en termes d'erreur quadratique moyenne de tels systèmes. Les formes d'ondes utilisées et les traitements associés seront adaptés aux cibles d'intérêt. En particulier on formalisera en terme de fonction d'ambiguïté et de caractéristiques Doppler l'utilisation de ces formes d'ondes.

Indépendamment de cette étude, les protagonistes de ce projet continueront leurs activités et collaborations personnelles.

R. Boyer développera les thématiques suivantes :

- Méthodes rapides de décompositions tensorielles non-orthogonales en collaboration avec le département TSI (Traitement du Signal et des Images) de l'ENST-Paris. L'objectif est d'étendre le travail réalisé pour les décompositions orthogonales de type décomposition en valeurs singulières généralisées aux décompositions tensorielles non-orthogonales.
- Localisation en champ proche par méthodes d'estimation séquentielles. Cette thématique est abordée en collaboration avec le département SSE (*Signaux et Systèmes Électroniques*) de Supélec et une collaboration avec M. Haardt de l'université d'Ilmenau est envisagée. L'objectif est l'exploitation de méthodes d'estimation séquentielles, qui ont montré un fort potentiel lors d'un stage de M2R réalisé au L2S.
- Traitement d'antenne a priori dans un cadre stochastique. Dans le cadre du post-doctorat de G. Bouleux, une collaboration avec P. Stoica de l'université d'Uppsala a été entamée. L'objectif est d'étendre les résultats de la thèse de G. Bouleux sur l'étude de la borne de Cramer-Rao avec a priori au cas stochastique. Cette borne développée dans un cadre déterministe permet d'intégrer la connaissance d'une partie du sous-espace signal.

Dans le cadre des traitements STAP (*Space Time Adaptive Processing*) pour l'élimination de fouillis en vue de la détection de cibles mobiles au sol par radar aéroporté, les perspectives de travail de **S. Marcos** s'inscrivent dans la continuité des travaux réalisés dans les thèses de H. Belkacemi et S. Beau. Tout d'abord, il s'agira d'évaluer les performances des algorithmes proposés sur des signaux réels et/ou synthétiques mis au point dans le cadre du club STAP auquel nous participons aux cotés de l'ONERA, THALES, CELAR/DGA, IETR Rennes, Université de Liège, GEA/Université de Paris X, ENS Cachan, ENSICA, Sondra/Supélec, Armée de l'air. Nous proposons ensuite de concevoir des méthodes alternatives à celles existantes dans la littérature et contraignantes en pratique qui soient appropriées au cas du radar bistatique voire du radar multistatique (émetteurs et récepteurs dé-localisés). Nous comptons nous inspirer, par exemple, de méthodes de traitement du signal non stationnaire. Nous envisageons également de déterminer des critères d'optimisation de géométrie d'antenne propres aux traitements (filtrage) STAP dans la suite de réflexions menées avec P. Ries, de l'Université de Liège, en stage de fin de thèse au laboratoire Sondra/Supélec. En effet, dans le domaine de l'estimation, il existe des bornes comme celles de Cramer-Rao alors qu'il n'existe pas de critères analogues dans le cas du filtrage optimal. Nous envisageons également de prendre en compte dans nos algorithmes l'effet d'un fouillis non homogène, non stationnaire et/ou non gaussien. Afin de comparer des traitements STAP entre eux, et notamment sur signaux réels dont on ne connaît pas la matrice de covariance théorique, nous proposons d'étudier la détection CFAR (*Constant False Alarm Rate*) après traitement STAP, sujet qui a été amorcé dans le cadre du stage de H. Meziani.

A. Renaux continuera sa collaboration avec A. Nehorai de l'université Washington à Saint Louis, sur le thème de l'estimation de points de ruptures avec application en imagerie médicale. Un étude en collaboration avec F. Pascal du laboratoire Sondra/Supélec, sur des problèmes d'estimation Radar en environnement non-gaussien a également commencée. Dans le cadre d'une collaboration avec E. Chaumette de l'ONERA, un travail sur les performances des systèmes radar pour des problèmes conjoints de détection et d'estimation est en cours. Enfin, en collaboration

avec J.-P. Ovarlez (ONERA), F. Pascal (Sondra/Supélec) et S. Marcos, une étude sur les performances des méthodes spatio-temporelles radar (STAP) à débuté.

1.2 Groupe Problèmes Inverses

Notons que les effectifs permanents du groupe sont réduits de moitié depuis la rentrée 2008, avec le départ à la retraite de G. DEMOMENT et la promotion de J.-F. GIOVANNELLI à Bordeaux comme professeur des universités. Ainsi, nous présentons dans ce document uniquement le programme de recherche de A. MOHAMMAD-DJAFARI, DR CNRS et T. RODET, M&C à l'université Paris Sud. Ce programme est décliné en trois volets, (1) les travaux méthodologiques, (2) les nouvelles applications et (3) les travaux de valorisation.

Méthodologie

Estimation des hyperparamètres et paramètres instruments Comme nous l'avons vu dans la partie bilan, on peut estimer conjointement les paramètres d'intérêt, les hyperparamètres, les paramètres de la réponse instrument et des variables cachées. On parle dans ce cas de *problème inverse étendu*. L'inversion du problème repose sur une loi a posteriori étendue, c'est à dire une loi de l'objet recherché mais également de ces paramètres supplémentaires. La règle de Bayes fait alors apparaître des lois a priori pour ces nouvelles grandeurs qu'il faut donc expliciter. L'idée est ici de tirer partie des structures des lois pour obtenir des algorithmes d'échantillonnage de type MCMC efficaces.

Approche bayésienne variationnelle Quels que soient les problèmes inverses étudiés, une étape importante dans l'approche estimation bayésienne que nous développons est l'exploration de la loi *a posteriori*. Mais souvent l'expression de cette loi est complexe et son exploration ou même le calcul exact des estimateurs ponctuels du type MAP (Maximum *a posteriori*) ou EAP (Espérance *a posteriori*) sont trop coûteux. Deux voies alors sont possibles : l'utilisation de méthodes numériques d'échantillonnage (MCMC) ou l'approximation analytique par des lois plus simple à manipuler (approche bayésienne variationnelle). Nous avons déjà bien étudié la première voie [[A.05.S.01](#), [L5.05.Y.01](#), [A.06.S.01](#)] et commencé l'exploration de la seconde [[C.07.S.01](#), [C.08.S.01](#), [A.07.S.01](#)], dont il faudra comparer les performances avec celles de la première.

Modèle de mélange infini Dans bien des applications en imagerie (tomographie X, tomographie à émission de positons TEP...), une image représente une distribution qu'il est naturel de vouloir modéliser par une superposition de lois gaussiennes (un modèle de mélange). Un travail préliminaire a été entrepris en tomographie X pour modéliser l'image par une superposition d'un nombre fini de gaussiennes dont les paramètres peuvent être estimés par des méthodes simples (moindres carrés, maximum de vraisemblance ou bayésienne). Ce travail pourrait être utilisé en reconstruction rapide de volumes tomographiques, si la scène 3D est modélisable par un faible nombre de gaussiennes connu *a priori* (estimation paramétrique). Cependant, dans d'autres applications, une approche non paramétrique devient nécessaire. Par exemple dans notre projet de TEP en imagerie médicale, il nous faut étendre ces modèles à des mélanges infinis.

Copule et tomographie Dans le cadre d'un stage de Master Recherche, nous avons commencé à étudier la théorie des *copules* développée dans le domaine des statistiques et leurs applications à nos problèmes d'imagerie. En particulier, nous avons constaté qu'il y a un lien fort entre la construction d'une copule, et par conséquent d'une loi jointe entre deux variables à partir de ses deux marginales, et le problème de la reconstruction d'images en tomographie X à partir de projections horizontale et verticale. C'est un sujet qui démarre et que nous comptons explorer dans un avenir proche.

Applications

Imagerie médicale Dans le cadre d'une collaboration avec deux laboratoires du CEA (LIST et SHFJ), et avec l'appui de Digiteo, nous avons commencé en octobre 2007 un projet sur l'imagerie TEP où l'objectif est la caractérisation spatio-temporelle de l'activité cérébrale. C'est le sujet de la thèse de D. FALL. L'approche retenue est l'estimation non paramétrique et donc forcément bayésienne. Un travail en 2D a déjà été accompli. Nous allons étendre ceci progressivement au 2D+t au 3D, au 3D+t et peut être au 4D (spatio-temporelle complet).

Super-résolution en imagerie par microscopie Une collaboration est envisagée avec l'équipe *Micro et Nanosystèmes* de l'*Institut d'Électronique Fondamentale* (IEF). sur le thème *déconvolution, restauration, super-résolution et segmentation d'images de microscopes pour la métrologie 3D des micro/nanocapteurs (opto)(électro)mécaniques*.

Astrophysique

Herschel Le satellite Herschel est le futur observatoire à grande longueur d'onde de l'agence spatiale européenne (ESA). Il utilisera le plus grand télescope jamais placé dans l'espace (diamètre 3,5 m) et ouvrira un domaine spectral de 50 à 600 μm largement inaccessible depuis le sol. Un de ses enjeux majeurs sera de fournir à la communauté des cartes spectrales de l'émission étendue contenant toutes les échelles spatiales observées, de sites de formation stellaire dans notre galaxie jusqu'aux galaxies lointaines. Malheureusement, les détecteurs utilisés (détecteur bolométrique, télescope chaud, etc.) possèdent des limitations technologiques dont il est indispensable de s'affranchir pour une exploitation scientifique pertinente des observations. Pour cela, il faut développer des outils de traitement spécifiques. Ces outils relèvent de l'« inversion » et reposent à la fois sur un modèle instrument fiable et des méthodes de statistiques bayésiennes. Ceci correspond au travail de thèse que mène F. ORIEUX.

Darwin La future mission spatiale Darwin ¹ représente une des grandes orientations de la recherche spatiale dans les vingt ou trente prochaines années. Plusieurs méthodes sont déjà capables de découvrir la présence de planètes orbitant autour d'autres étoiles que le Soleil. Bientôt, elles permettront de détecter des planètes de la taille de la Terre. La mission Darwin veut entamer l'étape de recherche suivante, en se concentrant sur l'information spectroscopique provenant de ces planètes telluriques, afin de déterminer les constituants de leur atmosphère (H_2O , O_3 , CO_2). La détection de ces constituants est possible, malgré l'éloignement de ces planètes, grâce à leurs signatures spectrales. Le but de ce travail est de trouver la configuration de l'instrument qui maximise la détection de l'eau dans les spectres pour un flux de photons donné. Ce problème possède les contraintes suivantes.

- La détection de l'eau est d'autant plus facile que la précision spectrale est grande.
- Il est extrêmement difficile de collecter des photons provenant d'une planète extra-solaire. Nous avons donc un faible nombre de photons dans le faisceau.
- Si on veut obtenir le spectre de la lumière de la planète extra-solaire de manière précise, il faut multiplier le nombre de cellules de détection. Mais chaque cellule introduit un bruit supplémentaire (bruit propre au détecteur), la multiplication des cellules augmentent donc le niveau de bruit.

Pour résoudre ce problème nous devons concevoir un algorithme d'estimation des concentrations des principaux constituants des atmosphères des planètes extra-solaires (ozone, eau, gaz carbonique), mettre en œuvre l'une des méthodologies présentées de la partie *choix de modèle* pour obtenir la probabilité des différents modèles possible (présence ou non d'eau) et tester la configuration qui maximise la probabilité de détection de l'eau.

SMESE (*Small Explorer for Solar Eruptions*) est dédiée à l'observation des éruptions solaires. C'est une mission franco-chinoise qui doit être lancée en 2013. L'IAS est le principal constructeur de l'instrument LYOT qui effectuera des observations du disque et de la couronne à 121.6 nm (raie Lyman alpha de l'hydrogène). L'inversion de ces données correspondra à la poursuite du travail de thèse de N. BARBEY. Il portera sur la paramétrisation des structures observées et l'estimation du nombre des structures présentes dans la scène (choix de modèle).

Imagerie microondes et inversion 3D en électromagnétisme Il s'agit de travaux commencés lors de la thèse d'O. FÉRON [T.06.Y.01] qui s'est déroulé en collaboration et en co-encadrement avec le DRE. Le principal apport est le développement de méthodes d'estimation bayésienne pour l'inversion des équations d'ondes non linéaires en mode TE puis TM. D'un point de vue modélisation directe, nous sommes resté dans le cadre 2D [C.05.Y.01, A.05.S.01, A.05.Y.01, C.05.Y.02, C.06.Y.02, C.06.Y.01, C.05.S.02, C.05.S.01]. Ces travaux sont poursuivis en 3D dans le cadre de la thèse de H. AYASSO, démarré en octobre 2007, également en co-encadrement et en collaboration avec le DRE. En parallèle avec l'application en imagerie micro-ondes, il y aussi un travail méthodologique sur l'utilisation de l'approche variationnelle pour le calcul bayésien est en cours de développement [A.07.S.01, A.08.S.01, C.08.S.01].

Projet de Valorisation

Tomographie 3D Le temps de calcul est l'un des principaux verrous à la valorisation des méthodes de reconstruction tomographique que nous avons développées. En effet, on s'intéresse à des problèmes tridimensionnels où le nombre d'inconnus et le nombre de données est typiquement supérieur à deux millions, l'objectif étant à terme de reconstruire des volumes à $512^3 = 134\,217\,728$ inconnues. L'étape de projection consiste à intégrer l'objet 3D selon un ensemble de droites qui le traversent. Si on considère un cube de reconstruction de N éléments de côté, il faut de l'ordre de $4N^4$ opérations pour calculer la projection de l'objet. Enfin, comme nous utilisons des méthodes de reconstruction itératives, nous effectuons la projection un grand nombre de fois (plus de 200).

Afin de réduire le temps de calcul, nous proposons de paralléliser un code de reconstruction afin de le lancer sur des super-calculateurs. Pour l'instant, nous avons un cluster comportant 64 unités de calcul, et nous allons essayer d'acquérir un super-calculateur constitué de cartes vidéo comportant 1024 unités de calcul.

Ce travail vient de démarrer dans le cadre d'une convention OMTE de Digiteo et avec l'appui des services de valorisation du CNRS.

¹<http://lanl.arxiv.org/abs/0707.3385>, http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm

1.3 Systèmes de télécommunications

Durant le quadriennal précédent, le groupe comportait sept permanents, et a accueilli un nombre important de thésards et post doctorants. Son activité s'est largement diversifiée, et en particulier, les travaux sur les antennes multiples, indispensables en tant que telles il y a peu dans le domaine des télécommunications, s'en sont peu à peu éloignées. Les activités correspondantes ont donc migré vers le groupe *Modélisation* pour la période suivante. Ceci correspond au mouvement de S. Marcos et R. Boyer, à 50 % pour ce dernier. De même, les activités en tatouage de signaux audiovisuels peuvent paraître a priori assez éloignées du domaine des "télécommunications" proprement dit, mais les techniques et outils utilisés sont clairement les mêmes (étalement de spectre, information adjacente, etc...) avec une coloration "sécurité" qui de toute façon tend à être prise de plus en plus en compte côté communications.

L'effectif global sera donc pour le prochain quadriennal de 1 DR, 1 CR, 3,5 MdC, 1 IR (P. Brault arrivé en 2006) issus de la composition précédente du groupe, plus A. Fraysse (MdC à l'IUT de Cachan) qui a rejoint le groupe en septembre.

Notons la forte implication de l'équipe dans le réseau d'excellence NEWCOM++ du 7ème PCRD. La plupart des perspectives indiquées ci dessous bénéficieront de ce cadre.

1.3.1 Théorie de l'information et codage pour les réseaux

La théorie de l'information pour les réseaux est l'étude des transmissions fiables dans un réseau où plusieurs sources et utilisateurs souhaitent communiquer. Les futurs réseaux sans fil seront certainement conçus pour connecter plusieurs systèmes et leurs utilisateurs. Il est donc très important d'étudier l'interaction et le comportement des systèmes interconnectés : interférences entre utilisateurs, information adjacente, robustesse, sécurité, coopération entre utilisateurs, etc.

Nous nous focaliserons tout d'abord sur les limites théoriques de communication (codage canal) et compression (codage source) pour des modèles simples de réseaux, qui puissent être des prototypes de situations plus complexes. Ces limites fondamentales fournissent des outils pour la conception de codes pratiques. C'est ce qui est arrivé récemment dans différentes situations : canaux sans fil à antennes multiples (codes spatio-temporels), codes *multicasting* (codes *rateless*), codes pour routage efficaces dans des communications coopératives (codes *LDPC*). Nos études auront pour objectifs de contribuer au développement de nouveaux codes source et canal pour les réseaux bruités ainsi que de mettre en œuvre des techniques de codage pratiques avec information adjacente. Les retombées attendues sont à moyen, voire long terme, bien que les distances théorie/applications se réduisent rapidement. C'est pourquoi, même sur les aspects les plus avancés, une partie du travail s'effectuera dans le cadre de contrats de recherche.

Limites fondamentales des réseaux coopératifs (collaboration avec le Département Télécoms)

Les communications dans les réseaux sans fil peuvent devenir plus fiables et efficaces lorsque les appareils s'aident mutuellement pour transmettre des données. Par exemple, les canaux de diffusion coopératifs consistent simplement en un émetteur communiquant l'information simultanément à plusieurs récepteurs. Les liaisons de relais sont incorporées dans les récepteurs pour faciliter la coopération entre les utilisateurs. Les régions de capacité de tels scénarios ont été caractérisées dans quelques cas seulement, pour les positions extrêmes des relais, c'est-à-dire quand le relais est très proche de l'émetteur ou du récepteur. Dans les cas intermédiaires, le schéma de codage optimal reste inconnu. Il n'est même pas certain qu'une telle stratégie soit efficace dans toutes les conditions. En effet, plus le nombre de relais augmente, plus le nombre de paramètres à estimer croît, et plus le niveau d'interférence est élevé.

L'objectif de cette étude consiste à évaluer, en termes de gain de capacité, le compromis optimal entre les avantages et les limitations d'une coopération dans les réseaux sans fil en incluant des contraintes réalistes telles que les délais, les conditions de coordination, et le niveau d'interférence induit par une telle stratégie. Ce travail bénéficie d'un financement de l'institut Carnot C3S, pour ressourcement thématique.

Information adjacente imparfaite (feedback incomplet et décodage désadapté). Collaboration avec la Chaire Alcatel et le Département Télécoms.

La capacité du canal MIMO multi-utilisateur avec une connaissance imparfaite à l'émetteur reste une question ouverte. La connaissance du canal à l'émetteur joue un rôle clé dans les communications multi-utilisateur en particulier sur l'augmentation de la capacité grâce au multiplexage. Ceci a déjà été démontré dans les communications point à point où le manque de connaissance du canal à l'émetteur amène une perte en puissance seulement. Il est donc important d'étudier des stratégies d'estimation et de feedback en tenant compte des aspects spécifiques des communications multi-utilisateur tels que la diversité, l'accès multiple sur le canal de retour, et le compromis entre le coût de l'estimation de retour et la qualité de connaissance. L'idéal serait d'obtenir ces résultats dans le cas de fortes mobilités où le canal n'est connu ni à l'émetteur ni au récepteur.

De même, nous étendrons le travail sur les réseaux coopératifs (Network MIMO, réseaux virtuels) au cas où les paramètres du canal ne sont pas parfaitement connus, soit à cause de l'imprécision de l'estimation, soit à cause du canal de retour.

Enfin, nous poursuivrons le travail initié en codage de source avec information adjacente dégradée au décodeur, qui nous semble être approprié pour la modélisation de la prédiction dans des données vidéos : certaines zones de l'image courante sont efficacement prédites par les images précédentes, alors que d'autres ne le sont pas (ou le sont très mal). Du coup, les techniques récentes de codage de source avec information adjacente ne s'appliquent pas efficacement. Nous avons donc proposé de les modifier pour prendre en compte ce caractère aléatoire de l'utilité de l'information adjacente. Reste à évaluer cette modification, et à l'intégrer dans des codeurs. Cet outil sera également utilisé pour la proposition de codeurs robustes.

Sécurité et cryptographie

a) Couche physique (Coopération avec la Chaire Alcatel) Récemment, il est apparu que dans des réseaux sans infrastructure il était très difficile d'assurer la sécurité de la communication point à point en passant par plusieurs nœuds en utilisant les techniques classiques de cryptographie (problèmes d'authentification, etc.). Dans cette optique, le medium sans-fil apparaît comme un nouveau paradigme dans la mesure où il contient l'information reliant de manière unique deux entités. Toute entité physique ne peut y accéder si elle est distante d'une demi-longueur d'onde. Ainsi, dans le cadre de réseaux en mode TDD (*Time Division Duplexing*), des clés de cryptage peuvent être générées (après des algorithmes d'auto-calibration des antennes) à partir du canal, et peuvent servir à sécuriser le réseau. Il est aussi possible d'encrypter l'information dans les zéros du spectre dans des canaux sélectifs en fréquence afin d'éviter qu'une tierce personne ne puisse écouter (Précodage du type *Vandermonde Frequency Division Multiplexing*). D'un point de vue théorique, il est important d'étudier la capacité des techniques de cryptographie couche physique dans des contextes de fortes mobilité et de proposer de nouvelles définitions de débits (incorporant la couche protocolaire nécessaire à la sécurisation des communications, ce qui n'est pas fait actuellement) où le medium radio est exploité.

b) Couche application De la même manière que la sécurité n'était jusqu'ici que très peu prise en compte au niveau de la couche physique et doit y trouver sa place, il apparaît maintenant que les outils utilisés en communications numériques peuvent aussi être utilisés dans des domaines liés à la sécurité. Il s'agit essentiellement du codage avec information adjacente, largement utilisé en tatouage/ stéganographie de signaux audiovisuels. Dans ce cadre nous nous attachons à proposer des méthodes qui soient non seulement imperceptibles, mais aussi objectivement non détectable. Ceci fait l'objet de deux projets ANR : ESTIVAL et MEDIEVALS. Dans ESTIVALE (en cours), nous nous intéressons aux caractéristiques des méthodes de tatouage informé pour renforcer l'indiscernabilité statistique de la marque. Nous cherchons une catégorie de méthodes à la frontière du tatouage et de la stéganographie bénéficiant du meilleur compromis robustesse invisibilité/indiscernabilité et capacité. Nous nous attachons également à respecter un cadre juridique et économique réaliste. Au sein de MEDIEVALS (qui démarre en 2008), nous cherchons une méthode de tatouage pour des applications audio pour laquelle il est difficile voire impossible de dissocier tatouage et chiffrement sélectif.

Codage réseaux pour les canaux sans fil (coopération avec le Département Télécoms)

Le codage réseaux (*Network Coding*) est un concept récent dans les communications à travers des réseaux classiques tels qu'Internet, qui vise à remplacer le *simple* routage. Considérons un réseau de communication point à point pour lequel des sources d'information seront *multicastées* vers des ensembles de nœuds de destination. Le codage réseau généralise le routage en définissant la sortie de chaque nœud du réseau comme une fonction arbitraire de données arrivant sur les liens ascendants. Les résultats incluent des algorithmes déterministes centralisés et des algorithmes aléatoires distribués qui maintiennent une complexité très faible. Cependant, la théorie actuelle du codage de réseaux révèle que le *multicasting* de sources, efficace lorsque celles-ci sont vues comme un *fluide*, qui peut être simplement routé ou répliqué, est en général non-optimal en présence de canaux sans fil. En employant des stratégies avancées aux nœuds, fondées sur la relation entre le codage réseaux et le codage source-canal, le codage réseaux pourrait être généralisé et nous espérons ainsi améliorer la capacité et la robustesse. Ces travaux sont effectués dans le cadre de projets partenariaux au sein de Digiteo et d'une allocation de recherche Carnot.

1.3.2 Conception/optimisation inter-couches

Les systèmes de communication ont longtemps été conçus de manière indépendante à l'intérieur de chaque couche OSI. Cette manière de travailler a déjà connu des exceptions. A titre d'exemple, la notion même de qualité de service dit que la qualité du lien physique doit être adaptée à la robustesse de l'application aux erreurs. C'est déjà une première entorse à une optimisation séparée. Puis, les travaux se sont orientés vers des optimisations d'une couche prenant en compte les contraintes issues d'autres couches, et se dirigent actuellement vers une optimisation conjointe. Cette problématique a pris d'autant plus d'importance que l'on se dirige vers des communications multi-utilisateurs,

des réseaux de capteurs, des optimisations prenant en compte le signal qui circule (les grandes augmentations de débit sont souvent attribuées à la transmission de multimédia, et surtout de vidéo). Ces aspects sont décrits ci-dessous. Il sera clair à la lecture de ce qui suit que les connaissances nécessaires couvrent l'ensemble de la chaîne, du codage de source à la couche physique en passant par les couches réseau. Les coopérations à l'intérieur d'un groupe étendu et les travaux en liaison avec des industriels sont ici fondamentales pour poser les bons problèmes et prendre en compte l'ensemble des contraintes.

Codage/décodage source canal conjoint et transmission robuste

Il s'agit ici de prendre en compte le type de signal qui transite dans l'optimisation inter couches pour une meilleure réception.

Décodage : De nombreux travaux précédents nous ont permis d'étudier précisément des problèmes d'utilisation de techniques de type décodage source/canal conjoint (DSCC) dans des réseaux de communication réalistes utilisés actuellement. Ceci nous a amenés à proposer des stratégies d'estimation d'entêtes et de retransmission prenant en compte l'existence de DSCC dans le récepteur. Nous n'en sommes qu'au début de cette stratégie, qui sera déclinée dans différents contextes, et complétée par quelques briques de base manquantes (segmentation, prise en compte d'hypothèses plus réalistes qui posent des problèmes théoriques importants, etc.) Ce travail est pour l'essentiel financé via des projets (ANR : DIVINE, AII : TVMSL, Microsoft), et ne remet pas en cause les normes existantes : on conçoit de meilleurs récepteurs, compatibles avec les standards actuels. Ce travail nous mènera naturellement vers l'optimisation globale inter-couches d'une pile protocolaire, premier pas vers le codage conjoint.

Codage : Si l'on s'autorise à modifier les codeurs de source pour une meilleure optimisation globale, de nombreux travaux sont possibles, dont certains sont d'ores et déjà initiés. Comme il s'agit de travaux à plus long terme, ils sont effectués via des bourses du ministère, voire des projets blancs ANR. Parmi les sujets qui seront traités, citons l'étude des performances de codes de sources en termes de correction d'erreurs et le codage vidéo robuste utilisant du codage de source avec information adjacente au décodeur. Là aussi, nous nous attacherons à confronter les travaux théoriques effectués à leur intégration dans des contextes réalistes.

Par ailleurs, nous souhaitons poursuivre un investissement dans la recherche en compression, afin de pouvoir y adapter ensuite les outils de décodage conjoint que nous développons. Pour cela, une collaboration a été entamée avec France Télécom R&D (I. Amonou) pour l'encadrement de la thèse de M. Moinard sur l'étude d'un schéma de compression hybride structure/texture par analyse-synthèse. Ce schéma entre dans le cadre d'une évolution de la norme H264 vers H265 et est prévu dans une approche hiérarchique. La compression consiste à remplacer, au décodage, une partie naturelle de l'image, identifiée comme une texture, par une partie synthétisée en utilisant un faible nombre de paramètres. Fondée sur les méthodes d'*inpainting*, l'analyse pourrait s'appuyer sur des décompositions de type *steerable pyramid*. Afin d'éviter l'incohérence temporelle (*jitter*) dans une approche par blocs de l'analyse-synthèse, il est nécessaire d'effectuer celle-ci dans un cadre spatio-temporel (*tube temporel*). Un module d'estimation du mouvement par *motion-threading* est une des méthodes envisageables pour assurer cette cohérence. C'est bien sûr avant tout une amélioration du rapport débit/distorsion qui est visée.

La collaboration sur la thèse de M. Moinard devrait se renforcer en particulier pour ce qui est de l'amélioration de la cohérence temporelle dans les schémas de synthèse pour la compression hybride. L'analyse et la synthèse de structures en compression peut d'autre part faire appel à des méthodes de segmentation rapides, voire de filtrage spatio-temporel. Dans ce dernier cas, des approches de type ondelettes et schéma *lifting* peuvent être intéressantes à mettre en oeuvre car elles s'intègrent bien dans une approche multirésolution hiérarchique. L'optimisation des méthodes d'estimation de mouvement pour des applications comme la compression, le filtrage et la segmentation fera également partie de nos perspectives. Enfin il est prévu d'entretenir une collaboration avec J.-P. Antoine (UCL) sur l'identification de *patterns* spatio-temporels par ondelettes adaptées au mouvement.

1.3.3 Coopération ou compétition dans les réseaux sans fil

Les travaux de Foschini (1996) et de Telatar (1999) ont ouvert une voie d'amélioration des performances des systèmes de communications en analysant des communications avec des terminaux à plusieurs antennes (systèmes MIMO). Une seconde étape majeure a été de comprendre qu'il était possible de récupérer une partie de ces gains de manière distribuée en faisant coopérer des terminaux (MIMO virtuel, diversité coopérative). Cependant, dans certaines applications, la coopération directe et la gestion de réseaux de terminaux peut engendrer une signalisation intensive coûteuse en débit, voire néfaste en termes d'interférence. Le concept de réseaux décentralisés, déjà présent dans les recherches sur la radio cognitive et les réseaux de capteurs, apparaît alors comme un cas extrême où la signalisation est faible mais qui, si elle est bien conçue, peut retrouver une partie des gains d'un réseau centralisé voire même d'un réseau coopératif. Au delà des problèmes précis évoqués ci-dessous, qui constituent des axes de travail à court et moyen terme, il existe une problématique sous jacente à la coopération dans les réseaux sans fil : que ce soit pour le relayage, le codage de réseaux (appliqué au sans fil), les réseaux hétérogènes, *on se demande en*

quoi un mobile (ou un réseau) peut aider à une meilleure transmission de communications qui lui sont pas destinées. Or, les premières techniques proposées pour résoudre ces problèmes sont assez différentes. Une vision homogène, à laquelle nous travaillerons (sur financement Digiteo) devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes et des propositions d'algorithmes efficaces.

Réseaux sans fil coopératifs (Coopération avec le Département Télécom et la Chaire Alcatel)

Nous considérons des réseaux où tous les terminaux (ou une partie d'entre eux) sont susceptibles de communiquer directement, sans contrôle d'une station de base. Nous cherchons à évaluer les performances de certains réseaux simples en termes de débit de transmission de Shannon, de probabilité de coupure et de taux d'erreur binaires. Le protocole de relaying étant un point-clé de ce type de réseau nous travaillons également sur ce point. Nous comptons approfondir les aspects suivants :

- Conception de stratégies de relaying pratiques. La stratégie de relaying *amplify-and-forward* (AF) est particulièrement utilisée dans la littérature, en grande partie pour sa simplicité. Cependant, il s'agit d'une stratégie purement analogique alors que la plupart des récepteurs sont maintenant numériques. Notre idée a été de proposer une alternative numérique à cette approche, en exploitant l'idée du codage source-canal conjoint que nous avons adaptée dans le contexte des canaux coopératifs variables dans le temps.
- Canaux quasi-statiques. Quand les canaux de propagation entre nœuds d'un réseau varient lentement dans le temps (contexte *slow fading*), l'exploitation de la diversité spatiale est essentielle pour satisfaire les demandes en débit des utilisateurs avec des probabilités suffisamment fortes. Nous analysons en particulier la probabilité de coupure et le compromis diversité-multiplexage correspondant à différents schémas de coopération classiques (AF, DF, CF) ou originaux. Notre activité consiste également à proposer et étudier des protocoles nouveaux dépassant les performances des schémas classiques, et plus appropriés aux transmissions sur canaux *slow fading*. Cette perspective de recherche est motivée par le fait que les protocoles usuels se révèlent en partie inadaptés au contexte *slow fading* considéré. Des techniques avancées sont actuellement étudiées par le département Télécoms de Supélec dans le cadre du projet URC du pôle de compétitivité System@Tic. Des travaux futurs dans le cadre du plan quadriennal viseront à étendre les études actuelles au cas de réseaux coopératifs multi-utilisateur (canaux MAC coopératif, broadcast coopératifs, réseaux ad-hoc).
- Optimisation inter-couches (projet RAF du pôle de compétitivité System@Tic) : L'utilisation des services temps réel (video, voix) dans ces réseaux présente un défi vu les contraintes temporelles sévères de ces services en termes de délai et de gigue. En effet, l'augmentation du nombre de pas de relaying entraîne une augmentation de délai et ainsi une violation de la qualité de service. L'allocation des ressources radio dans ces réseaux doit être conçue à l'issue d'une étude inter-couches visant à optimiser conjointement les couches : physique (relaying, MIMO, etc.), MAC (*Medium Access Control*), réseau (routage) et application (contrainte de l'application, délai, jitter, etc.). Le but de ce travail est de trouver une solution inter-couches permettant d'optimiser les performances d'un tel système avec un nombre de relais variables. Plus précisément, on s'intéressera à l'introduction des mécanismes de sélection des nœuds servant de relais, pour éviter qu'un trop grand nombre de signaux superposés vienne inonder la situation initiale. Ensuite, on étudiera l'impact de ces mécanismes sur l'allocation des ressources radio et la répartition des fréquences et des tranches de temps entre les liaisons directes et la coopération dans le but de trouver un équilibre satisfaisant entre le relaying au niveau de la couche physique et celui au niveau réseau.
- Optimisation de ressource dans les réseaux hétérogènes (coopération avec le Département Télécom, et support partenarial de Motorola). Cette étude se place dans un contexte de réseaux sans fil hétérogènes destinés à la téléphonie mobile et la transmission des données. Plus particulièrement, il s'agit de la cohabitation de réseaux étendus (UMTS, WiMAX, LTE) et locaux (WIFI), où l'utilisateur est supposé pouvoir maintenir simultanément de multiples connexions à des points d'accès ou des stations de bases utilisant éventuellement plusieurs technologies radio. L'objectif est d'étudier et de proposer des mécanismes et des algorithmes permettant d'assurer une utilisation efficace de la capacité cumulée des systèmes hétérogènes étudiés. Une allocation de ressources centralisée nécessiterait un important trafic de signalisation. Ceci nous conduit à développer des méthodes d'optimisation de ressources distribuées ou semi distribuées qui nécessitent une communication ou coopération entre les différents systèmes et les utilisateurs. L'objectif est de réduire le coût de cette coopération tout en gardant l'efficacité des solutions proposées. Nos outils sont issus de la théorie des jeux, de la théorie de l'optimisation et incluent certaines méthodes méta heuristiques.
- Réseaux ad-hoc à forte densité de capteurs où les nœuds coopèrent. Notre travail concerne ici l'optimisation des couches supérieures en vue de gérer efficacement l'interférence excessive produite par ce type de réseau. Ce travail s'effectue dans le cadre du projet *Poseidon* du Pôle de compétitivité System@Tic.

Réseaux sans fil distribués (coopération avec le Département Télécom, et la Chaire Alcatel)

La thématique de recherche présentée ici concerne les réseaux sans fil où les terminaux sont quasi ou même totalement autonomes d'agir dans leur propre intérêt et éventuellement dans l'intérêt de la société que constitue le

réseau. Le type d'action possible correspond ici au choix de l'allocation de puissance du terminal selon différents degrés de liberté (spatiaux, fréquentiels, temporels, etc.) et par *intérêt* nous entendons principalement le débit puis l'efficacité énergétique d'une transmission. Dans le but de programmer la partie cognitive des terminaux de tels réseaux, nous exploitons la théorie des jeux avec joueurs rationnels. Nous travaillons actuellement sur quatre axes principaux :

- allocation spatiale et distribuée de puissance,
- optimisation de l'autonomie énergétique d'un terminal dans un réseau distribué,
- transfert inter-cellulaire distribué,
- gestion distribuée du spectre et de l'interférence entre terminaux.

Pour tous ces aspects, nous mettons au point des stratégies d'allocation, de gestion, etc., et quantifions la sous-optimalité du réseau distribué par rapport au système centralisé, par exemple avec des métriques telles que le prix de l'anarchie.

1.3.4 Couche physique et outils mathématiques avancés

Géométrie de l'information pour l'analyse des algorithmes itératifs (F. Alberge)

Les algorithmes itératifs de type turbo ont constitué une avancée majeure dans le domaine des télécommunications numériques. Ces algorithmes optimisent conjointement plusieurs composantes du récepteur, contrairement aux approches classiques qui réalisent séparément l'optimisation de chaque composante. Bien que ces méthodes soient largement utilisées, leur étude analytique reste inachevée. Les algorithmes de type turbo ne sont pas les seuls algorithmes itératifs couramment employés en communications numériques. On peut citer par exemple l'algorithme EM (*Expectation-Maximization*) utilisé pour l'estimation au sens du maximum de vraisemblance ou bien l'algorithme de Blahut-Arimoto pour l'évaluation des capacités de canaux. Nous proposons d'utiliser la géométrie de l'information pour l'analyse, l'interprétation et l'amélioration des algorithmes itératifs. Il s'agit d'une activité de recherche amont, aux retombées potentielles importantes. Elle peut se décliner selon les cinq axes suivants :

- Lien entre les algorithmes itératifs et les algorithmes d'optimisation classique de type Dykstra ou projections alternées. Utilisation de cette analogie pour produire une analyse complète et générale de la convergence des algorithmes itératifs.
- Extension des interprétations en terme de projection aux diverses alternatives à l'algorithme BCJR. En effet, la plupart des études de convergence réalisées à ce jour reposent sur l'utilisation de cet algorithme au niveau du décodeur. Or, en pratique, il est souvent remplacé par des alternatives efficaces telles que log-MAP, SOVA, max-log-MAP. Une piste d'étude possible est de modéliser ces modules SISO approchés en utilisant des projections bruitées.
- Extension des algorithmes de type turbo à d'autres situations en relâchant certaines hypothèses ou en ayant recours à d'autres types de distances.
- Lien avec la physique statistique. Une analogie peut être faite entre les turbo-décodeurs et les approximations (Bethe, Kikushi) issues de la physique statistique et permettant de faire des calculs d'énergie libre. Pour les algorithmes de type propagation de croyance, il existe une équivalence entre les points stationnaires de ces algorithmes et les points stationnaires de l'approximation de Bethe. La dépendance est moins claire et reste à établir pour les algorithmes itératifs de type turbo.
- Programmation linéaire et décodage. Des résultats récents ont montré que la programmation linéaire pouvait permettre le décodage de turbo-codes. Les résultats sont encore très partiels et ne s'appliquent qu'à des situations particulières. C'est toutefois une piste intéressante qui permettrait de relier le décodage itératif et les techniques plus classiques d'optimisation pour lesquelles les mécanismes de convergence sont parfaitement connus.

Estimation à travers un réseau (coopération avec le Département Télécoms)

De plus en plus, que ce soit dans les situations référencées comme *réseaux de capteurs*, *réseaux ad hoc*, voire dans des réseaux traditionnels, on cherche à estimer certaines quantités à travers un réseau de communication sans fil. Or, les réseaux sans fil possèdent des particularités (erreurs de transmission, nécessité de réduire la consommation, débit réduit, asynchronisme éventuel, etc.) qui doivent être prises en compte. Dans ce contexte, nous aborderons les sujets suivants :

- estimation d'état ensembliste dans un contexte distribuée,
- estimation robuste, toujours dans un contexte distribué,
- impact de l'existence du réseau sur les processus d'estimation (asynchronisme, pertes de données, etc.),
- et nous viserons à poser le problème général (liens entre théorie de l'information et l'estimation).

Théorie des jeux (coopération avec la Chaire Alcatel)

La théorie des jeux dans le cadre des télécommunications sans fil est devenue une discipline importante pour optimiser ce type de réseau (des conférences du type *GameCom* ont même lieu chaque année). L'utilisation qui en est faite repose encore souvent sur des stratégies et des fonctions d'utilité très primitives qui ne sont pas adaptées au contexte des réseaux sans fil. Ceci reste un chantier important d'adaptation et d'analyse. En particulier, le cadre général permettant de définir des stratégies avec une connaissance partielle de l'environnement (jeux bayésiens) ainsi que l'étude des dynamiques de convergence (jeux dynamiques, jeux évolutionnaires) pour étudier en combien d'étapes la stratégie converge vers l'équilibre) ne sont que très rarement abordés. Enfin, il faut adapter les outils de comparaison du type *price of anarchy* pour pouvoir quantifier le gain (ou la perte) de stratégies centralisées par rapport au cas décentralisé ou coordonné.

1.3.5 Conclusion

Comme tout texte prospectif, celui-ci ne constitue qu'une photographie instantanée de nos intentions, dans un domaine en évolution rapide. Leur réalisation pourrait subir des évolutions importantes. Nous espérons que la rédaction d'un programme de travail commun (disponible), et l'existence de liens plus forts avec le Département Télécoms et la Chaire Alcatel aboutissent à une meilleure compréhension des domaines d'activités de chacun, et de leur évolution. Du coup il aidera à l'établissement de collaborations plus nombreuses que celle indiquées ici. Certains sujets s'avèreront certainement moins fructueux qu'attendu et seront peu développés, alors que d'autres apparaîtront, et prendront de l'ampleur. Nous viserons également à mettre le savoir faire correspondant en commun, en partageant au maximum les algorithmes résultants, en particulier sur le sujet des communications coopératives, qui apparaît comme central pour les prochaines années.

Chapitre 2

Division Systèmes

Le bilan des activités de la division *Systèmes* met souvent en évidence les évolutions prévues dans la poursuite des axes méthodologiques et des applications décrites. Nous présentons ici des thématiques nouvelles en précisant leurs liens avec les compétences actuelles et en motivant ces choix. Nous décrivons successivement des axes méthodologiques, des axes applicatifs et des actions fédératrices, en indiquant leurs promoteurs en interne et des collaborations déjà envisagées.

2.1 Axes Méthodologiques

2.1.1 L'automatique au delà de la commande de processus (E. Walter)

Les outils développés par les automaticiens dans le domaine de la modélisation des systèmes dynamiques et de l'estimation de paramètres et de variables d'état de modèles à base de connaissance trouvent des applications dans des domaines qui ne se limitent pas à la commande de processus, terre traditionnelle de l'automatique et il nous semble important d'explorer ces domaines que l'automatique a relativement peu investis. Illustrons ceci par trois exemples :

- la conception de produits et de leur processus de fabrication fait de plus en plus intervenir des modèles complexes et incertains, et implique une prise de décisions qu'on espère robuste à ces incertitudes. Comme il est rare que l'on puisse ramener cette prise de décision à la minimisation d'une fonction coût scalaire et comme il existe en général une multitude de contraintes à prendre en compte, nous souhaitons continuer à travailler sur l'optimisation robuste multicritère sous contraintes de systèmes complexes. Un aspect important à prendre en compte est que les simulations de ces systèmes sont souvent fort coûteuses, ce qui peut limiter drastiquement leur nombre. Il s'agit alors de proposer une solution raisonnable bien plus que d'espérer trouver une solution globalement optimale. Cette étude devrait faire l'objet d'une collaboration avec le Département Signaux et Systèmes Electroniques de Supélec, avec des applications dans des domaines de l'ingénierie très variés, que ce soit en interne avec le Département de Recherche en Electromagnétisme ou en externe avec Digiteo et System@tic notamment.
- Dans de nombreux domaines des sciences exactes et naturelles, par exemple en physique, en chimie, en biologie ou en pharmacie, on construit des modèles mathématiques de systèmes dynamiques qui font intervenir des paramètres ou des variables d'état inconnus. La question de l'identifiabilité de ces paramètres ou de l'observabilité de ces variables d'état devrait donc être considérée comme importante, or ces concepts sont souvent complètement ignorés, comme peuvent l'être les concepts de planification d'expérience qui permettent pourtant de choisir le protocole de recueil des données qui soit le plus informatif compte-tenu des contraintes. Il y a là matière à des collaborations interdisciplinaires avec nos partenaires académiques, et tout particulièrement à Paris-Sud, et nous l'espérons, la possibilité de populariser les méthodes de l'automatique et leur enseignement dans des disciplines où elle est peu ou pas présente jusqu'ici.
- Les outils de simulation numérique garantie des systèmes non linéaires dynamiques incertains que nous contribuons à développer et les outils d'estimation garantie qui leur sont associés (optimisation globale garantie, estimation ensembliste à erreur bornée) restent encore très confidentiels alors qu'ils représentent une vraie révolution conceptuelle, puisqu'il devient possible de prouver des propriétés mathématiques d'ensemble en utilisant des calculs sur les nombres flottants. Nous souhaitons continuer à contribuer à leur dissémination partout où ils peuvent s'avérer utiles et à les améliorer pour leur permettre de donner des réponses pertinentes à des problèmes de plus en plus complexes. Ceci fera l'objet d'une collaboration avec la division Signaux du L2S et nos collègues de Digiteo.

2.1.2 Systèmes échantillonnés (D. Normand-Cyrot)

Pierre Barbot (ENSEA-Cergy Pontoise), Stefano di Gennaro (Université de l'Aquila), Claudia Califano (DIS, Université de Rome), Paolo di Giamberardino (DIS, Université de Rome), Mohamed Djemai (ENSEA-Cergy Pontoise), (DIS, Université de Rome),

Les thèmes actifs seront poursuivis et complétés de trois axes spécifiques.

Observateurs non linéaires échantillonnés Comment préserver sous échantillonnage les performances d'un observateur construit sur un modèle continu ? Comment procéder directement à une reconstruction en temps discret à partir de données échantillonnées ? Ces deux questions sont incontournables en pratique. Il s'agira d'élargir les conditions d'application des travaux antérieurs soit en modifiant les injections de sortie, soit par des techniques d'échantillonnage multiple.

Systèmes dynamiques échantillonné sur les groupes de Lie La commande continue de systèmes évoluant sur des groupes de Lie matriciels est très attrayante pour plusieurs raisons. Sur un plan mathématique, la structure géométrique est forte et les systèmes d'équations associés relativement simples. Sur un plan pratique, les exemples sont nombreux, traditionnellement mécaniques : structures articulées, satellites, robots. Notre intérêt pour la commande de tels systèmes provient de travaux antérieurs où nous avons montré que la classe des systèmes chaînés et certaines de ses extensions admettent des modèles discrets équivalents exacts, facilement calculables. Ces travaux seront étendus aux dynamiques évoluant sur les groupes de Lie matriciels.

Inéquations de dissipativité sous échantillonnage et façonnement de l'énergie Les techniques de commande reposant sur des critères énergétiques décrits par des inéquations fonctionnelles sont bien connues en temps continu, elles font référence aux concepts de passivité des systèmes et conduisent à la conception de type Lyapunov et aux techniques de façonnement de l'énergie. Malheureusement, sauf dans le cas particulier d'un lien entrée/sortie direct, la propriété de dissipativité est perdue sous échantillonnage. En montrant qu'une certaine inégalité est maintenue sous échantillonnage il s'agira de d'étudier, à partir d'un concept nouveau de passivité au sens de la moyenne (*average passivity*) d'étudier les propriétés de passivité sous échantillonnage et de concevoir des stratégies de commande.

Ce travail sera réalisé dans le cadre du doctorat de Fernando Tiefensee (Allocataire de recherche du Ministère depuis 2008) en co-tutelle Franco/Italienne (co-responsable S. Monaco, Université de Rome *La Sapienza*). Programme UFI/UIF Vinci. Un projet de Recherche entre le L2S, l'ENSEA à Cergy Pontoise, l'Université de Rome, et l'Université de l'Aquila est soumis au Programme de recherche Galilée 2009.

2.1.3 Estimation, commande non linéaire et commande adaptative des systèmes pPhysiques (R. Ortega, F. Lamnabhi-Lagarrigue, E. Panteley)

Nous poursuivrons nos recherches sur l'estimation (des paramètres et de l'état) et la commande non linéaire des systèmes en utilisant des modèles qui tiennent compte des lois de la physique. Nous considérerons en particulier les exemples suivants :

- (i) stabilisation de systèmes mécaniques sous-actionnés (systèmes robotiques, systèmes pendulaires et grues avec câbles flexibles) sans mesure de vitesse,
- (ii) stabilisation et suivi des trajectoires de systèmes électromécaniques (micro-électromécanique, lévitation magnétique et moteurs) sans mesure des coordonnées mécaniques (commande sans capteur) et avec paramètres incertains,
- (iii) contrôle PI nonlinéaire de convertisseurs électriques de puissance opérant en mode discontinu et avec charge inconnue,
- (iv) commande non linéaire de téléopérateurs bilatéraux avec retard variable et inconnu,
- (v) régulation de réacteurs chimiques à cinétique incertaine,
- (vi) compensation de facteur de puissance et réduction de pollution harmonique dans les systèmes électriques avec charges non linéaires utilisant des filtres actifs,
- vii) amélioration de la stabilité transitoire dans les réseaux électriques via la commande de l'excitation des générateurs et l'incorporation de *flexible AC transmission systems*,
- viii) contrôle optimal du flux de puissance (*power flow*) dans des réseaux des unités génératrices (pile à combustible, générateur synchrone), de stockage d'énergie (supercapacités, volant d'inertie) et charges (moteurs, compresseurs),
- (ix) régulation de la stoechiométrie (rapport d'oxygène) dans des piles à combustible avec dynamique incertaine (caractéristiques du compresseur et de la membrane).

Les outils théoriques et méthodologiques suivants devront faire l'objet de recherches pour résoudre ces problèmes :

- (i) La commande fondée sur la passivité (façonnement de l'énergie) dans ces deux formulations principales : *assignation de l'interconnection et de l'amortissement* et *contrôle par interconnection*. Dans le premier cas l'énergie est façonnée par un retour d'état et dans le second le contrôleur est un système dynamique (avec sa propre fonction d'énergie et ses variables d'état) interconnecté avec le procédé à commander de façon à ce que leurs fonctions d'énergie s'ajoutent. Récemment, nous avons prouvé l'équivalence entre ces deux méthodes pour les systèmes hamiltoniens.
- (ii) Les techniques d'immersion et d'invariance pour l'estimation de l'état et de paramètres et pour la commande non linéaire. Un livre vient d'être publié chez Springer résumant une partie de nos recherches.
- (iii) La commande intégrale par échantillonnage et commutation sur des sorties passives. Cette technique permet de faire l'injection de l'amortissement en remplaçant la mesure de la sortie passive par celle de son intégrale - un problème d'un intérêt particulier pour les systèmes mécaniques où la sortie passive est la vitesse qui, en général, n'est pas mesurable.
- (iv) La génération de nouvelles sorties passives par redéfinition du modèle mathématique décrivant la dynamique du système en termes de la puissance dissipée au lieu de l'énergie stockée. Ces nouvelles propriétés conduisent à une stratégie alternative de commande appelée *commande par façonnement de la puissance*.
- (v) La génération de fonctions de Lyapunov strictes pour les systèmes mécaniques.

Ces travaux bénéficieront de l'activité de nombreux doctorants du L2S (A. Sanchez, R. Talj, I. Sarras, F. Castanos, W. Dib et D. Shah). Ils impliqueront également de multiples collaborations internationales (J.A. Acosta (Universidad de Sevilla, ES), A. Astolfi et D. Karagiannis (Imperial College, UK), R. Grino et L. Basanez (Universitat Politècnica de Catalunya, ES), R. Banavar (IIT Bombay, IN), N. Barabanov (South Dakota University, EU), D. Sbarbaro (Universidad de Concepcion, Chile), G. Escobar (IPICYT, MEX), R. Kelly (CICESE, MEX), G. Espinosa (UNAM, MEX), et J. Scherpen et A. van der Schaft (University of Groningen, NL)

2.1.4 Retards, dynamiques et interconnexions (S. Niculescu)

Parmi les conséquences typiques des interconnexions de systèmes, on peut citer une complexité accrue, l'émergence de nouvelles dynamiques, et l'impact sur l'environnement ou sur les effets induits par celui-ci (vu dans un sens large), avec éventuellement la non-séparabilité de ces aspects. Les réseaux de communication, de transport et/ou de distribution fournissent des exemples typiques de systèmes interconnectés. Un de problèmes difficiles dans l'analyse de tels systèmes est lié à la complexité de la modélisation, due principalement à la grande taille, à l'hétérogénéité et au caractère dynamique des interconnexions (équilibres, transfert ou échange de flux, transport et propagation entre nœuds, etc.).

L'approche que nous allons considérer est fondée sur l'adaptation de modèles complexes issus des lois de la physique (dynamiques des fluides) au cadre *analytique* des *systèmes à retard*. Ces modèles peuvent être décrits par des EDPs ou directement par des équations différentielles fonctionnelles (EDFs). L'utilisation de tels modèles dans une stratégie de commande implique de plus de prendre en compte les éléments associés à la discrétisation des EDPs sous forme d'EDOs (équations différentielles ordinaires), ce qui nécessite, en principe, la représentation d'un continuum physique sous la forme d'un ensemble d'éléments interconnectés. Ce projet se concentre principalement sur l'analyse des retards dans des tels systèmes tout en exploitant la *structure* des interconnexions. Ces retards apparaissent naturellement dans la modélisation des phénomènes de transport et de propagation dans le cas des réseaux de communication et/ou de distribution (par exemple, le cas des systèmes commandés à travers des réseaux en vue d'une synchronisation de mouvements, une simulation collaborative ou une téléopération, etc.). Ils sont également utiles pour la modélisation des effets induits par la présence du facteur humain dans le processus de décision (cas des réseaux de transport) ou les sciences de la vie (modélisation des dynamiques de populations structurées par âge).

Parmi les objectifs scientifiques de ce projet, citons la prise en compte du caractère *distribué* des retards dans la modélisation de telles interconnexions, ainsi que le développement d'*algorithmes de calcul* pour l'analyse des effets induits par la présence des retards sur les dynamiques des interconnexions considérées.

2.1.5 Commande de systèmes non linéaires (Y. Chitour)

Avec F. Jean et E. Trélat, nous regardons des questions de géométrie sous-riemannienne liées aux trajectoires anormales ; avec U. Boscain, nous nous intéressons à des problèmes issus des neurosciences ; enfin avec M. Sigalotti et D. Kateb, nous regardons des questions de généricité liées au contrôle d'EDPs ainsi que des problèmes sur les systèmes à commutation. L'étude des systèmes avec saturation sera continuée.

2.1.6 Synchronisation des systèmes (A. Loria)

Les thématiques de recherche envisagées portent notamment sur la synchronisation de systèmes sur réseau, la formation de systèmes physiques et les systèmes coopératifs, la synchronisation et les systèmes à commutation, et la synchronisation de systèmes chaotiques pour la transmission sécurisée d'information.

Synchronisation de systèmes sur réseau de communication : Dans un cadre général on aura un système de commande (un contrôleur) recevant de données à travers le réseau et en envoyant des consignes de commande par le même biais. Aux problèmes que posent la synchronisation de systèmes (maître-esclave ou mutuelle) s'ajoutent les particularités des réseaux de communication : données échantillonnées, incertitudes paramétriques, retards, saturation de la capacité de transmission, etc.

Formation de véhicules autonomes : Il s'agit d'étudier des problèmes de synchronisation mutuelle (aucune hiérarchie entre les véhicules) et de maître-esclave, où l'on pourra envisager plusieurs systèmes esclaves suivant un même maître. Les applications concernent la formation de véhicules, qu'ils soient aériens, terrestres ou (sous)marins : exploration, missions difficiles pour l'homme, missions qui requièrent l'interaction de plusieurs agents, économie de capteurs en favorisant l'échange d'information entre véhicules, etc. Nous nous intéresserons aux problèmes de formation de véhicules terrestres (robots mobiles), aériens (satellites), ou marins.

Systèmes à commutation : Dans un futur proche, nous espérons aborder des problèmes de stabilité de systèmes à commutation de systèmes linéaires et non linéaires. Nous explorerons des techniques de synchronisation de systèmes à commutation du système maître (un système esclave suivant successivement plusieurs maîtres).

2.1.7 Théorie algébro-différentielle des problèmes d'observation (S. Diop)

Parmi les problèmes d'observation ouverts, deux nous préoccupent particulièrement. Le premier est la question du *placement de capteurs*. Il est clair que celui-ci a une grande influence sur la complexité et la robustesse (vis-à-vis d'incertitudes de modèle ou de mesure) des solutions que l'on peut apporter à certains problèmes d'observation. Nos techniques algébriques différentielles permettent de montrer que, pour une large classe de systèmes, un unique capteur suffit pour rendre le système observable ; un tel capteur peut simplement mesurer une combinaison linéaire non stationnaire des composantes de l'état du système. Ce résultat ne paraît pas avoir une application directe en pratique dans la synthèse d'observateurs, sauf dans des cas rares où des capteurs seraient disponibles pour pratiquement toutes les composantes de l'état à observer. En revanche, appliqué à des questions de synthèse d'observateur où les capteurs potentiels diffèrent en coût, en fiabilité ou en précision, une généralisation du résultat précédent serait directement utile.

Le second problème qui nous tient à cœur est lié à ce qui est communément appelé la *robustesse*, un concept d'une grande importance pratique. Sa prise en compte théorique pose cependant des difficultés intrinsèques. En particulier, observer un système c'est observer un modèle de celui-ci ; si ce modèle représente mal le système, on pourra s'attendre à ce qu'un observateur construit à partir de ce modèle produise des estimées grossièrement erronées. Des outils algébriques ont montré leur intérêt pour quantifier l'écart des réponses en fonction des écarts de modèle. Pour le moment ces outils relèvent du linéaire. Nous cherchons à les généraliser à quelques cas non linéaires.

2.2 Axes Applicatifs

2.2.1 Caractérisation du contact électrique soumis au *fretting* (S. Tliba, W. Pasillas-Lépine)

Les mécanismes d'usure par *fretting* des contacts électriques sont encore mal compris et peuvent difficilement être modélisés. La dégradation des contacts électriques survient, par exemple, au niveau des connecteurs de cartes électroniques embarquées à bord de véhicules terrestres ou aériens, soumettant les systèmes électroniques embarqués à un environnement vibratoire, mécanique et thermique sévère, responsable de cette usure prématurée.

Pour palier ce problème, diverses approches sont employées dans l'industrie. Citons en premier lieu l'utilisation de revêtements adéquats, dont la composition physico-chimique continue de faire l'objet de travaux de recherche en partenariat avec le milieu universitaire [LGEP, équipe CE]. L'utilisation de lubrifiants est une autre façon de limiter cette usure, qui soulève des problèmes techniques. Citons enfin, le recours aux dispositifs d'amortissement passif ou actif des vibrations tels que ceux décrits dans la partie bilan de ce rapport.

Cette action se positionne dans le cadre du travail de thèse de R. Belakhdar au sein de l'équipe *Contacts-Électriques* (CE) du LGEP. Notre objectif est de promouvoir les outils de l'automatique (modèles d'état, identification...) et du traitement du signal pour caractériser les principales propriétés du contact conducteur de type sphère-plan en vue d'une meilleure compréhension des phénomènes multiphysiques en présence et de disposer de modèles d'usure prédictifs.

2.2.2 Stabilité transitoire des réseaux de puissance (R. Ortega, F. Lamnabhi-Lagarrigue)

Le système de puissance européen est l'un des plus grands et des plus complexes jamais construits. Il se déploie sur deux (et bientôt trois) continents, est constitué de centaines de millions de consommateurs, et de centaines de milliers de producteurs allant des grandes centrales nucléaires aux petits générateurs d'énergies renouvelables notamment solaire et éolienne. Il va actuellement de la Pologne à la Tunisie, et sera étendu au Moyen Orient en passant

par les Balkans et la Turquie d'un côté, et par la Libye et l'Égypte de l'autre, pour former l'anneau méditerranéen. Différents types de perturbations, même très localisées, peuvent le perturber gravement. Les méthodes actuelles de stabilisation, qui agissent juste après une perturbation ou une dégradation, sont parfois défailtantes, comme en témoignent les coupures durant ces dernières années, largement rapportées dans la presse, en Amérique du Nord, en Europe du Sud et plus récemment en Norvège. Il est donc crucial d'élaborer de nouvelles lois de commande stabilisantes. Ces systèmes en réseau, dont les principaux composants sont les générateurs, les lignes de transmissions et les charges, forment un ensemble non linéaire complexe. Les difficultés majeures sont nombreuses. L'alternateur ne possède qu'une seule entrée pour commander ses sorties, et constitue un système fortement non linéaire et couplé avec plusieurs paramètres inconnus. On manque d'informations sur les composants distants (ou ces données sont communiquées avec retard). Les alternateurs sont interconnectés, et leurs vecteurs d'état ne sont pas complètement accessibles.

Le développement d'une commande pour ces systèmes est devenue encore plus complexe à cause de divers changements récents ; la libéralisation de la production, l'intégration de différents systèmes indépendants et l'introduction des énergies renouvelables ont en effet radicalement changé la structure des réseaux de puissance.

Nos travaux porteront en particulier sur :

- une contribution au développement de nouvelles commandes, ou de systèmes de commande distribués, embarqués sur des sous-systèmes non linéaires en réseau, notamment les alternateurs de puissance (usines électriques utilisant éventuellement des énergies renouvelables),
- la conception d'observateurs pour estimer les variables d'état inconnues,
- le calcul explicite de lois de commande en utilisant les résultats récents sur la technique dite des modèles conservant la structure (*structure preserving models*) (qui assurent la convergence asymptotique des trajectoires vers le point d'équilibre) pour des réseaux multi-machines.

2.2.3 Systèmes de direction innovants (W. Pasillas-Lépine)

Le but de cette collaboration avec Mariana Netto (LIVIC, Versailles) est de mieux comprendre les fonctions proposées, au niveau des systèmes de direction, pour assister le conducteur dans le guidage latéral de son véhicule. Dans ce domaine, l'expérience acquise par le L2S (lors de collaborations avec PSA Peugeot Citroën) est assez complémentaire de celle du LIVIC (qui a l'habitude de travailler sur de gros projets mettant en œuvre des véhicules prototypes et des essais sur piste).

Les fonctions de base des systèmes de direction sont la DAE ou *direction assistée électrique* (dans le bas de gamme) ; le GEP ou *direction assistée électro-hydraulique* (dans le milieu de gamme), la *direction assistée hydraulique pilotée*, l'AFS ou *active front steering* et la *crémaillère à pas variable* (dans le haut de gamme). Bien que la totalité des véhicules actuels soient munis d'au moins une de ces fonctions, la littérature scientifique est assez avare en études théoriques de celles-ci (dimensionnement des organes, stabilité et robustesse des lois de commande, phénomènes non-linéaires, phénomènes de résonance, influence des retards, etc.). L'objectif de notre recherche dans ce domaine sera donc de mieux comprendre le comportement de ces fonctions élémentaires et d'essayer de fournir des bases mathématiques plus rigoureuses pour aider à leur conception — dans le même esprit que notre travail sur l'ABS. La fonction prioritaire sera d'abord la DAE, car c'est celle qui est la plus proche de notre domaine d'origine : l'automatique.

En plus des fonctions de base, il existe aussi des fonctions de plus haut niveau (la détection et l'assistance au conducteur liées aux sorties de voie, les systèmes pour personnes handicapées ou à mobilité réduite, etc.), sur lesquelles le LIVIC travaille depuis plusieurs années. Notre projet de collaboration porte sur l'étude du couplage entre les fonctions de base et celles de haut niveau. En effet, nous croyons qu'une meilleure compréhension mathématique des fonctions élémentaires pourrait faciliter l'étude de ce couplage. À plus long terme, notre collaboration devrait aussi porter sur les systèmes *steer-by-wire*, qui regroupent l'ensemble des fonctions de base en un seul système.

Nous comptons contacter les pôles de compétitivité Movéo, et System@tic et le RTTRA Digateo, afin d'essayer de mutualiser le matériel expérimental.

2.2.4 Observation et contrôle du drone IBISC (W. Pasillas-Lépine, F. Lamnabhi-Lagarrigue)

Il s'agit d'une collaboration avec Gilney Damm (IBISC, Évry) et J. A. Acosta (ETSI, Séville). Depuis quelques années, l'IBISC développe un drone de type quadrirotor pour lequel deux des moteurs peuvent pivoter (le long d'un axe commun). Même si la littérature sur la commande de quadrirotors est extrêmement abondante, il n'existe quasiment aucun résultat pouvant s'appliquer directement au drone développé par l'IBISC.

Les questions de base auxquelles nous souhaitons répondre portent sur le niveau de performance qu'il est possible d'atteindre (pour un même niveau de consommation électrique, est-il possible, par exemple, de se déplacer plus rapidement qu'avec un quadrirotor standard ?) et les lois de commande adaptées à ce type d'engin, en fonction des configurations de capteurs disponibles.

2.2.5 Modélisation en biologie (B. Laroche)

Nous sommes plus particulièrement confrontés dans le domaine de la modélisation en biologie à deux problèmes sur lesquels vont porter nos réflexions. Le premier est celui de la réduction/simplification de modèles lorsque, comme c'est souvent le cas, la représentation des connaissances concernant le système étudié conduit à un modèle de très grande dimension d'état (éventuellement infinie) et de très grande dimension paramétrique. Nous nous intéresserons à l'impact de la réduction d'ordre et de la modélisation multi-échelle pour la simulation et pour l'estimation des paramètres (obtention de lois de distribution ou d'intervalles de présence). Des réflexions pour l'instant informelles sont en cours avec le projet INRIA SISYPHE (collaboration avec F. Clément), et les travaux en cours sur l'épidémiologie animale avec l'INRA vont se poursuivre. Le deuxième problème est celui de la sélection de modèles étant donnée l'information disponible pour l'estimation. En effet, la mise en équation de phénomènes pour lesquels on ne dispose que d'informations qualitatives (ou semi quantitatives) ou d'hypothèses, amène à considérer plusieurs structures de modèles, entre lesquelles il faut choisir. Le choix est bien sur très dépendant des mesures réalisables et des données disponibles pour l'estimation des paramètres du modèle. L'identifiabilité théorique des systèmes de dimension infinie rentre dans ce cadre et les travaux entrepris vont se poursuivre. Le problème de la sélection de modèle est bien sur très lié à la notion de sensibilité paramétrique, ou identifiabilité pratique. Ce type de problème va être abordé par Rafael Munoz-Tamayo dans le cadre de la deuxième partie de sa thèse où il confrontera son modèle de la chaîne trophique du côlon à des données issues d'expérimentation sur des rongeurs axéniques. Les perspectives pour des projets de modélisation en collaboration avec des biologistes sont prometteuses et nombreuses, comme en témoigne la journée interdisciplinaire INRA/CNRS du 5 juin dernier destinée à susciter des collaborations biologistes/modélisateurs sur le thème "Compréhension et modélisation du devenir de l'aliment dans le tube digestif". Nous avons pu y présenter nos travaux sur la modélisation de la chaîne trophique de digestion anaérobie des hydrates de carbones dans le côlon humain. D'autres collaborations avec des biologistes de l'Université Paris Sud sont également en projet.

2.2.6 Modélisation et estimation de la digestion anaérobie (S. Diop)

La digestion anaérobie est au cœur de la production de méthane sur notre planète depuis la nuit des temps (gaz naturel fossile) jusqu'aux conséquences actuelles de l'élevage intensif. Certains déchets (municipaux, industriels ou agricoles), s'ils ne sont pas traités, peuvent libérer des quantités considérables de méthane. Si le méthane est l'un des gaz qui contribuent le plus puissamment au réchauffement de la planète, c'est aussi une source d'énergie relativement propre, contrairement au gaz carbonique,.

Une maîtrise de la production de méthane par digestion anaérobie est ainsi d'une grande importance à la fois sur le plan écologique et sur le plan de l'approvisionnement en énergie.

Jusqu'à des «digesteurs» sont construits un peu partout dans le monde souvent sans apport de techniques de contrôle moderne. Nous sommes associés à un projet de construction d'une usine expérimentale en Bulgarie pour l'étude et la maîtrise du procédé de digestion anaérobie (avec I. Simeonov, de l'Académie des sciences de Bulgarie). Les défis que ce projet visent à relever sont la maîtrise des facteurs d'échelle permettant d'extrapoler les conclusions issues des études sur des bioréacteurs de laboratoire à l'échelle de très gros réacteurs, la diversité d'origine des déchets pouvant alimenter le bioréacteur, et la garantie d'un rendement énergétique favorable. C'est un projet relativement ambitieux qui fait appel à de nombreux collègues d'autres disciplines. Notre contribution est attendue dans la partie estimation et contrôle (qui renferme une bonne part de modélisation également).

2.2.7 Synchronisation et désynchronisation neuronales (E. Panteley, W. Pasillas-Lépine, F. Lamnabhi-Lagarrigue)

Certains symptômes de pathologies neurologiques répandues, tels que le tremblement et la dystonie, résultent de la synchronisation intempestive de groupes de cellules neuronales dans des régions sous-corticales du cerveau. Un traitement standard utilisé pour réduire ces symptômes est appelé stimulation cérébrale profonde (SCP) : il s'agit, au moyen d'électrodes implantées dans les régions sous-corticales visées (thalamus, noyau sous-thalamique ou *pallidum*), de générer un signal électrique d'une fréquence et d'une amplitude aptes à désynchroniser la population de neurones concernée. D'un point de vue modélisation, ces neurones peuvent être décrits comme des oscillateurs interconnectés. Des travaux théoriques sur des modèles simplifiés ont montré que, lorsque l'interaction entre ces oscillateurs dépasse une certaine valeur seuil, des synchronisations neuronales sont observées. Ce phénomène peut être traduit, en termes mathématiques, comme la formation d'un ensemble invariant non-trivial pour les solutions générées par cette interconnexion dynamique d'oscillateurs. Une analyse précise et rigoureuse des propriétés de cet ensemble invariant est une condition nécessaire à une compréhension en profondeur des phénomènes impliqués et, en conséquence, à l'optimisation du traitement par SCP.

Les perspectives à court terme (faisant l'objet de sujets de thèse ou de post-doc dans cet axe de recherche) sont, par exemple :

- l'analyse des perturbations externes, notamment les bruits colorés,

- la définition et l'exploitation de modèles plus réalistes pour simuler les activités neuronales (prise en compte des variations temporelles des paramètres de chaque neurone, de l'évolution de leur topologie d'interconnexion, et des incertitudes de modélisation),
- l'analyse de la stabilité et de la robustesse des méthodologies SCP existantes vis-à-vis de perturbations externes et d'incertitudes de modélisation.

Ces travaux font l'objet de collaborations avec A. Chaillat (EECI & SUPELEC) et avec le professeur S. Palfi, neurobiologiste et neurochirurgien, URA-CNRS 2210 et département de neurochirurgie de l'Hôpital Henri Mondor. Ils bénéficient d'une allocation doctorale fléchée du Ministère.

2.2.8 Contrôle actif des vibrations (S. Tliba)

Collaborations : G. Duc (Supélec), M. Pham-Thi (THALES Res. & Tech.)

Ce projet est conduit en collaboration avec G. Duc (Supélec) et M. Pham-Thi (THALES Res. & Tech.). Le développement du dispositif expérimental dont la réalisation a débuté fin 2006 sur financement du CNRS, du L2S et du département Automatique de Supélec se poursuivra. Nos perspectives concernent notamment l'étude de la théorie de la commande robuste et saturante ainsi que sa mise en œuvre afin de mieux prendre en compte le caractère réaliste et multicritère du problème de commande dans le processus de synthèse de correcteur.

La recherche de partenaires industriels sera également une de nos préoccupations.

2.2.9 Caractérisation de BioMEMS : projet Novéo (S. Tliba)

Le projet Novéo concerne l'étude de nouvelles approches matérielles et logicielles pour l'aide à la conception et la caractérisation de BioMEMS. Il s'agit d'un projet de recherche commun avec le CEA LIST (M. Boukallel) et le Département Automatique de Supélec (G. Duc) qui reçoit un financement du RTRA Digiteo depuis juin 2008.

Les objectifs recherchés dans ce projet s'organisent autour de trois lots de travail :

- Développement d'outils logiciels pour la conception assistée de BioMEMS (optimisation topologique et placement optimal d'actionneurs sous contraintes réalistes de fonctionnement).
- Développement d'une approche pour la caractérisation expérimentale, la calibration et la commande des BioMEMS.
- Développement d'un banc expérimental générique dédié à l'étude et l'analyse des BioMEMS.

Nous comptons déposer une demande de soutien à l'ANR en 2009 et rechercher des partenaires industriels.

2.2.10 Au cœur de la pile à combustible : défis et méthodes (F. Lamnabhi-Lagarrigue, R. Ortega)

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui génère de l'énergie électrique par réaction directe de l'hydrogène et de l'oxygène. La principale caractéristique d'une pile à combustible PEM, connue aussi sous le nom de *pile à combustible à membrane électrolyte polymère* ou de *pile à combustible à membrane échangeuse de protons*, est l'utilisation d'une membrane sélectionnant les protons, qui joue le rôle d'électrolyte et de séparateur physique entre les deux électrodes. Le cœur d'une pile à combustible PEM est le siège de réactions d'oxydoréduction. L'hydrogène alimentant l'anode est oxydé en protons et libère deux électrons, qui circulent vers la cathode via un circuit électrique extérieur, pendant que les protons rejoignent la cathode en traversant la membrane. La cathode est, quant à elle, alimentée en oxygène. L'oxygène est réduit créant des ions oxyde. Combinés aux protons provenant de l'anode, ces ions oxyde conduisent à la formation d'une molécule d'eau. Ce principe de fonctionnement est connu depuis 1939, quand Sir William Grove l'a mise en évidence. Cependant, c'est dans les années 50 que les premières applications ont été développées pour les satellites. Récemment, les avantages de la pile à combustible ont été mis en avant par les grands constructeurs d'automobiles. Effectivement, l'absence de pollution dans la génération directe de l'énergie électrique par conversion électrochimique, fait des piles à combustibles une des voies prometteuses comme source d'énergie propre. Comprendre les caractéristiques principales de la pile à combustible est essentiel pour la conception des lois de commande garantissant une bonne performance du système sous une variété de conditions environnementales et sur une large plage de fonctionnement. En pratique, une pile à combustible nécessite la présence de nombreux éléments auxiliaires, tels que des circuits d'amenée des gaz, les compartiments anodiques et cathodiques, un système d'humidification des gaz, un circuit de refroidissement de la pile car la réaction est exothermique, etc.

Une pile à combustible est donc un dispositif complexe dont les performances dépendent de la pile elle-même mais également des paramètres de ses auxiliaires, c'est-à-dire, des débits, pressions et températures de gaz, carburant et comburant, entre autres. Dans des applications de puissance, la pile à combustible doit être capable d'accepter des charges électriques mal connues et qui changent rapidement. Or la réponse de la pile à combustible est limitée par la dynamique complexe liée au bilan de masse et aux équilibres thermiques à l'intérieur et en dehors de la pile. Pour

tenir compte de ces limitations, tout système alimenté par une pile à combustible doit donc disposer d'une batterie ou super-condensateur et d'un convertisseur DC-DC capable de suivre les variations de tension de la pile. Les piles à combustible étant principalement utilisées pour l'alimentation de systèmes embarqués (par exemple, de véhicules de transport) une attention toute particulière doit être portée au rendement.

Le groupe impliqué dans le projet s'attachera :

- au développement d'outils théoriques pour la modélisation, l'analyse et la commande de systèmes liés à la pile à combustible et,
- à la construction d'un banc d'essais pour la validation expérimentale des résultats théoriques à partir d'un modèle tenant compte le plus possible de la réalité physique et qui servira de vitrine pour les industriels.

Nous nous consacrerons en particulier à la modélisation du système pile à combustible (pile, auxiliaires, convertisseur, batterie, etc.), tout en mettant l'accent sur la pile en "architecture ouverte". Cette nouvelle approche devrait apporter une meilleure compréhension et plus de maîtrise que l'utilisation de l'approche classique boîte noire qui considère la pile à combustible comme une source de tension statique non linéaire.

Nous travaillerons aussi sur la conception des lois de commande pour des applications spécifiques, par exemple, dans le domaine des transports avec ou sans dispositif de stockage d'énergie électrique.

Enfin, nous nous attacherons à la validation expérimentale des modèles et des résultats théoriques.

Ces travaux, qui bénéficient du soutien du RTRA Digiteo et du Réseau d'excellence HYCON (WP4a)s'effectueront en collaboration avec le LGEP et le CEA-LIST. Ils impliqueront trois doctorants (M. Hernandez, A. Sanchez, R. Talj)

2.2.11 Méthodes mathématiques pour la planification de trajectoires (Y. Chitour)

Ce projet démarré en novembre 2007 avec F. Jean (CMAP, Palaiseau) bénéficie d'un financement du RTRA Digiteo jusqu'en 2010 (bourse de thèse de R. Long et post-doctorat de T. Bayen). Nous regardons certaines questions de neurosciences sous l'angle de la géométrie sous-riemmanienne. Nous nous intéressons notamment à la géométrie des trajectoires locomotrices, à la neurogéométrie et à la planification motrice dans le système nerveux.

2.3 Actions fédératrices

2.3.1 EECI – European Embedded Control Institute

Participants : F. Lamnabhi-Lagarigue, A. Loria, S. Niculescu, R. Ortega, E. Panteley, W. Pasillas-Lepine

Collaborations : A. Chaillet, MdC SUPELEC & EECI

Financements : FP6 HYCON (coordination scientifique, FP7 NESTER (partenaire); FP7 ComplexEIT (partenaire; CPER 2007-2011

Le *European Embedded Control Institute* (EECI), association Loi de 1901 récemment créée et présidée par F. Lamnabhi-Lagarigue, est issu du Réseau d'Excellence HYCON (FP6-IST-511368) www.ist-hycon.org. Il a comme mission de pérenniser les actions de recherche, de formation, et d'innovation entreprises dans le domaine des systèmes embarqués et en réseau. Ces systèmes interviennent de plus en plus dans notre vie quotidienne à tous les niveaux (habitations, espaces personnels, hôpitaux, bureaux, voitures et transports en général, centres industriels, etc.). Ils intègrent des dispositifs intelligents qui peuvent détecter, communiquer, s'adapter et agir sur leur environnement. Souvent, des contrôleurs embarqués sont reliés par un réseau de communication, pour échanger des informations entre eux, avec d'autres systèmes ou avec des infrastructures. Nombre de systèmes embarqués, qu'ils soient centralisés ou distribués, sont critiques pour la sécurité. Assurer leur fiabilité, leur robustesse et leur sûreté de fonctionnement est donc un défi majeur.

La conception de systèmes embarqués est par nature multidisciplinaire et multimétier. Elle passe par une approche fondée sur des modèles (EDP, EDO continues, discrètes, systèmes à événements discrets, automates, systèmes hybrides) dans laquelle les concepts et outils de l'automatique, de l'informatique et des statistiques jouent un rôle fondamental; ils permettent de simuler, de valider, d'optimiser, de synchroniser, de fiabiliser, d'augmenter la robustesse et les performances et de réduire les temps et les coûts de conception, de mise au point, de production et de maintenance. Beaucoup reste à faire pour assurer une meilleure sécurité, une meilleure qualité (performances, robustesse), une meilleure disponibilité et une meilleure fiabilité. Pour mener à bien ces avancées, il faut à la fois, privilégier l'interdisciplinarité, développer des idées nouvelles fondamentales et collaborer étroitement avec les acteurs du domaine (industriels, ingénieurs, médecins...).

EECI (26 partenaires de 10 pays européens, environ 110 chercheurs et 150 doctorants, dont 12 chercheurs CNRS (L2S, LAAS et CRAN) vise à devenir un lieu international renommé, en stimulant de nouvelles collaborations (internationales et interdisciplinaires), en abaissant les barrières entre les disciplines traditionnelles, en disséminant les méthodes et outils associés, en organisant des formations pour les étudiants, les chercheurs et les ingénieurs et en participant au transfert des méthodologies vers l'industrie. EECI est membre de la Plateforme Européenne ARTEMISIA. Il est mentionné dans le rapport intitulé *Le Territoire de Massy-Saclay-Versailles-Saint-Quentin en Yvelines, Pôle d'Excellence Scientifique et Technique* comme *un des projets qui exploitent les synergies scientifiques*

et accroissent le rayonnement du Territoire. EECI a obtenu un financement de 890 KEUR dans le cadre du CPER 2007-2013 pour la construction de 300m² dans le nouveau bâtiment commun Centrale - Supélec. Enfin, un poste de Maître de Conférences de l'Université Paris Sud a été attribué à Supélec pour l'enseignement et à EECI pour la recherche. Parmi les actions récentes, on peut citer l'organisation de modules d'enseignement doctoral (10 semaines de cours intensifs en 2008 avec un total actuel de 167 inscriptions), l'organisation d'un Workshop de deux jours à l'*IFAC World Congress* de juillet 2008, ainsi que la participation à la rédaction du *HYCON Handbook of Hybrid Systems Control Theory-Tools-Applications*, édité par J. Lunze et F. Lamnabhi-Lagarrigue chez Cambridge University Press (paru en septembre 2008).

2.3.2 AML - STIC & A

Coordinateurs : D. Normand-Cyrot pour la France, S. Monaco (DIS-Rome) pour l'Italie.

Cet Accord Multilatéral pour la formation et l'obtention de doubles diplômes entre la France et l'Italie dans le domaine des Sciences et Technologies de l'Information et de Communication et ses Applications de la licence au doctorat est un programme labellisé par l'Université Franco/Italienne-Italo/Française - UFI/UIF.

Il permet à un étudiant inscrit dans une Institution (Université ou Ecole d'Ingénieur) signataire de l'AML de participer à un programme d'études conjoint afin de préparer et acquérir un double diplôme, celui de son institution d'origine et de l'une des institutions partenaires de l'autre pays. Le programme prévoit l'obtention de doubles diplômes pour les trois niveaux de formation L-M-D. Participer à un programme d'études conjoint requiert de suivre des enseignements et de passer des examens auprès des institutions des deux pays en respectant les règles décrites dans l'AML pour chaque niveau de formation relativement aux contenus didactiques et à la mobilité.

L'accord a été signé en 2005 par l'ensemble des Présidents/Recteurs/Directeurs des Institutions partenaires et le Recteur de l'Université de Rome *La Sapienza*. Les universités partenaires en Italie sont *Rome La Sapienza, l'Aquila, Brescia, Politecnica delle Marche, Catania, Lecce* et *Perugia*. Les partenaires en France sont les Universités de Paris Sud, Paul Sabatier à Toulouse, Nice-Sophia Antipolis, Nantes, Joseph Fourier à Grenoble et Cergy Pontoise. Les Ecoles partenaires sont Supaéro, Supélec, l'Ecole Centrale de Nantes, Polytech de Grenoble, Nantes et Nice Sophia Antipolis, l'ENSEA de Cergy Pontoise et l'ESIEE de Noisy -le-Grand.

D'autres partenariats et formations sont mis en place lors de chaque réunion annuelle des partenaires, l'adhésion requiert une seule signature avec l'Université de Rome qui engage le partenariat avec l'ensemble des sites en réseau. L'extension à l'Espagne et la Grèce est en cours. Des informations plus complètes sont disponibles sur le site : <http://www.dis.uniroma1.it/progint>

Chapitre 3

Département de Recherche en Electromagnétisme

Un avenir bien sombre

Se projeter dans les quatre années à venir n'est pas un exercice facile, et ne peut évidemment être effectué qu'à un certain niveau d'incertitude, vu le tout petit nombre de personnels permanents effectivement impliqués et les départs possibles ou certains (par retraite ou par mobilité). De ce point de vue, l'avenir du DRÉ est bien sombre : avec le départ à la retraite imminent de quatre de ses enseignants-chercheurs les plus capés (il perd tous ses professeurs des universités) et le départ prochain de deux maîtres de conférence (l'université Pierre et Marie Curie "récupère" ses enseignants-chercheurs), il va voir ses effectifs (en chercheurs et enseignants-chercheurs) amputés de 30% et ses thématiques très sérieusement écrémées. L'extrême incertitude des entrées ne vient pas arranger les choses. Il faut ici noter que, par suite de circonstances incompréhensibles, le poste de professeur ouvert au recrutement par l'université Paris-Sud en remplacement de J.-Ch. Bolomey (actuellement toujours présent au laboratoire dans le cadre d'un éméritat) a été attribué à un autre laboratoire ; à ceci s'ajoutent les échecs récents de nos candidats en chargé de recherche au CNRS en section 08 (E. Iakovleva en 2006, J.-P. Groby en 2007 et 2008), ainsi que le refus par O. Dorn, une fois soigneusement pesées les incertitudes de son avenir au CNRS par rapport à une proposition ferme de professeur à l'université Carlos III de Madrid, d'une chaire Junior de l'ANR obtenue en juin 2008. Bref, si les tutelles ne font pas rapidement un sérieux effort pour permettre au DRÉ de maintenir son potentiel en termes de personnel, son existence même sera menacée dans un avenir proche.

Mais laissons de côté dorénavant ces incertitudes de personnel, et leurs impacts attendus, possibles ou craints, sur la cohérence d'actions de recherche à long terme, et, éclairés par les actions passées dont certaines se poursuivent, revenons à la déclinaison de perspectives plus classiques.

Développements des moyens expérimentaux

Contrairement à celle des divisions Signaux et Systèmes, l'activité du DRÉ s'appuie sur des moyens expérimentaux internes importants dont l'existence est à la fois une charge, avec une situation critique en termes de personnel technique, et un atout précieux en termes de recherche appliquée et de contrats industriels. La forte activité contractuelle du DRÉ a permis non seulement de maintenir l'équilibre financier du département EMG en assurant le niveau de financement nécessaire à son poste "personnel", mais encore de doter le DRÉ d'équipements importants constituant un véritable investissement pour les prochaines années capable de répondre à de réels besoins. Bien entendu le DRÉ aura à cœur d'améliorer les performances de ces équipements : accroître la rapidité des mesures et leur précision demeure une priorité. Il aura également à cœur d'étendre leur capacités de mesure, les extensions envisagées portant essentiellement sur l'acquisition de moyens de mesure dans le domaine temporel, dont la nécessité se fait de plus en plus sentir.

Vers des mesures dans le domaine temporel

Le DRÉ est déjà impliqué dans des études expérimentales portant sur des radars, sur la conception d'antennes ULB ou sur les sources micro-ondes de forte puissance, dans le cadre de thèses, de groupes de travail ou de contrats d'études, avec des partenaires tels que l'ONERA ou la DGA. Cependant, tant d'un point de vue expérimental que numérique, ces travaux n'ont pu donner lieu à des développements dans le domaine temporel. Un nouveau domaine d'activité important pour les années à venir concerne l'extension des techniques de champ proche (utilisées dans les chambres anéchoïques du DRÉ et actuellement dédiées et limitées aux expérimentations dans le domaine fréquentiel) pour des études expérimentales dans le domaine temporel. De nouveaux protocoles expérimentaux seront développés en même temps que des outils de modélisation numérique permettant une analyse plus poussée des

phénomènes physiques rencontrés, ceci devant s'effectuer dans le cadre d'un post-doctorat sur financement Carnot. Il devrait en résulter un important approfondissement des modèles élaborés et une réponse plus pertinente aux questions industrielles qui nous sont soumises. Ceci nous conduira à renforcer les collaborations initiées avec les laboratoires voisins (SONDRA et LGEP dans le cadre du projet NANOTIME). Les travaux envisagés se justifient pleinement si l'on considère l'évolution actuelle des technologies dans le domaine des radiocommunications (téléphones mobiles, stations relais, antennes WiFi, bluetooth, GPS, étiquettes micro-ondes, badges de télédétection, etc.). Les demandes actuelles, pour lesquelles le laboratoire est sollicité, concernent soit le développement de nouveaux types d'antennes pouvant fonctionner sur de très larges bandes de fréquences (systèmes ULB multi-standards, antennes pour sources micro-ondes large bande de forte puissance, etc.), soit l'étude d'antennes à bandes étroites, mais dont il faut optimiser le fonctionnement dans un environnement particulier (antennes-radars embarquées sur véhicule et devant assumer des fonctions de communication avec d'autres véhicules ou avec des infrastructures routières, des fonctions d'alarme de détection d'obstacles, etc.). Le développement d'outils d'analyse dans le domaine temporel permettrait une caractérisation large bande plus rapide des antennes en champs proche et lointain et une évaluation de la contribution propre de tel ou tel objet dans la réponse globale reçue par une antenne après diffraction d'un signal par un environnement complexe (par exemple le sous-sol dans le cas du radar à pénétration de sol).

Déclinons maintenant les perspectives thématique par thématique.

3.1 Systèmes rayonnants complexes

3.1.1 Antennes : montée en fréquence des applications

La thématique de la technologie RFID (*Radio Frequency IDentification*) n'a été abordée que très récemment au DRÉ et elle reste très porteuse. Cette technologie est déjà largement utilisée pour reconnaître ou identifier (à plus ou moins grande distance et dans un minimum de temps) un objet, un animal ou une personne porteuse d'une étiquette capable d'émettre des données en utilisant des ondes radio. On peut citer, par exemple, la carte à puce sans contact, les systèmes de télépéage, les contrôles d'accès, etc. Les recherches de nos jours concernent leur utilisation dans certaines bandes de fréquences comme les UHF ou les hyperfréquences ainsi que les nouveaux services possibles. Dans le domaine des radiofréquences, la problématique est liée aux antennes, à la propagation, à la CEM et à l'exposition des personnes car les étiquettes RFID doivent généralement être de très faibles dimensions et pouvoir être détectées de plus en plus loin. Les bases, quant à elles, ne doivent pas se brouiller entre elles et ne doivent pas induire des champs électromagnétiques excédant les limites des normes d'exposition en vigueur. Ces contraintes semblent parfois contradictoires et un des objectifs des études est de trouver des solutions globalement compatibles. On envisage aussi des étiquettes avec des antennes ULB fonctionnant dans la gamme 6-10 GHz pour des applications à très fort débit. Toutes les nouvelles technologies sans fil (WiMAX, ULB, etc.) ont tendance à monter en fréquence. Les antennes deviennent plus complexes pour assurer également une meilleure qualité de service (par la diversité) ou de plus haut débits (MIMO). La réalisation des antennes dépend beaucoup des applications, mais les aspects CEM et expositions des personnes sont étroitement liés aux formes d'ondes et aux protocoles correspondants. Il est donc important d'établir des collaborations étroites avec les départements de Supélec concernés pour associer les différents acteurs (Télécom et chaire Alcatel/Supélec) dans des projets communs ou des réponses à des appels à projets de recherche nationaux ou européens ; ceci devrait être facilité par le projet de fédération de recherche (L2S - LGEP - départements propres de Supélec) en cours de construction.

3.1.2 Dosimétrie : intérêt pour les très basses fréquences

Bien sûr de telles collaborations existent déjà, par exemple dans le cadre du projet ANR "Multipass" (2007-2010). Ce projet permettra de développer des outils adaptés pour la caractérisation dosimétrique des systèmes ayant des émissions non régulières, comme le WiFi et le WiMAX. Au travers de ce projet, Supélec réunit les compétences complémentaires du DRÉ et du département Télécommunication pour répondre à la problématique de l'exposition aux ondes électromagnétiques liées aux systèmes de communication émergents dont les protocoles deviennent de plus en plus complexes. Les nouveaux moyens de calcul disponibles permettront également de relever un des défis actuels en dosimétrie numérique : modéliser fidèlement et rapidement le comportement électromagnétique des téléphones mobiles commerciaux en présence de la tête. Tous ces travaux feront l'objet de contributions dans des commissions internationales, en particulier aux comités de normalisation IEEE 1528 WG1 (mesures dosimétriques) et WG2 (calculs dosimétriques), et CEI 62209 (mesures dosimétriques) auxquelles le DRÉ participe depuis 2007. Un autre aspect du thème "exposition des personnes aux ondes électromagnétiques" sera développé : l'exposition de la population française aux champs électromagnétiques de très basse fréquence (TBF), en particulier au rayonnement à 50 Hz omniprésent, est fort mal connue contrairement à d'autres pays qui ont depuis de nombreuses années lancé des études soit de caractérisation de l'exposition soit d'épidémiologie. En effet, des doutes subsistent sur l'innocuité des champs magnétiques de très basses fréquences et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) souligne que l'énergie électrique fait partie de la vie quotidienne mais s'interroge sur l'éventualité d'un effet cancérigène de ces champs.

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC, une agence de l'OMS spécialisée dans la recherche sur le cancer) a achevé la première étape du processus d'évaluation du risque sanitaire qui classe les champs TBF, en se fondant sur le poids d'arguments scientifiques établissant leur pouvoir cancérigène chez l'homme. Le Comité supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) a émis un avis daté du 3 mars 2005 relatif aux champs magnétiques TBF, demandant de réaliser des études de caractérisation de l'exposition de la population française à ces champs. Sous l'égide de la Direction générale de la santé, Supélec a monté, en partenariat avec EDF et RTE, un projet EX-PERS visant à répondre à l'avis du CSHPF et qui concerne une étude menée sur 2000 personnes. Ce projet est en cours dans le cadre d'une thèse se déroulant au département SSE de Supélec et se terminera en 2009. Le DRÉ, pour sa part, s'occupe de la partie métrologie et validation des méthodes de mesures, de l'étalonnage des appareils et de la gestion de la logistique instrumentale. Cette étude bénéficie par ailleurs des liens tissés au plan international avec le *Health Protection Agency* (Royaume Uni) qui nous ont permis l'accès à de nombreux appareils de mesures (EmdexII) indispensables pour celle-ci.

D'autre part, le DRÉ collabore avec l'Agence française de sécurité sanitaire et du travail (AFSSET) et avec le Centre supérieur technique du bâtiment (CSTB) pour étudier et caractériser différents types d'environnements à très basse fréquence ; la poursuite de cette collaboration dans le cadre d'une thèse CIFRE est sérieusement envisagée.

Pour conclure, nous avons les moyens de contribuer à la connaissance de l'exposition aux champs TBF et à la caractérisation de ces environnements ; nous comptons développer notre expertise dans ce domaine car l'exposition aux champs TBF est un sujet sensible et tout-à-fait d'actualité, tant au niveau européen avec des directives à respecter pour la protection du public et des travailleurs qu'au niveau local où apparaît une grande sensibilité du public quant à la présence et aux effets de lignes à très haute tension.

3.2 Compatibilité électromagnétique

Les études en cours et à venir continueront à revêtir aussi bien le caractère amont que celui d'ingénierie, et seront toutes ou en partie abordées au travers de la simulation numérique et/ou de l'expérimentation. L'aspect contractuel restera une voie privilégiée dans la conduite de ces études. Ceci dit, la compatibilité radioélectrique concerne tous les nouveaux équipements et systèmes radio et une compétence universitaire indépendante des enjeux commerciaux serait tout à fait souhaitable dans l'avenir, de même qu'une participation aux groupes de réflexion ou aux organismes normatifs (tels que l'*European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), la Conférence européenne des postes et télécommunications (CEPT) et l'Union internationale des télécommunications (UIT)), car ces organismes mènent de nombreux travaux théoriques ou pratiques à travers les contributions apportées par les intervenants qui sont principalement des administrations ou des industriels.

3.2.1 La compatibilité des systèmes de radiocommunication aéronautiques

Le foisonnement de nouveaux systèmes sans fil (terrestres, aéronautiques, spatiaux, professionnels ou destinés au grand public) et l'évolution des systèmes existants rendent nécessaire la considération de la compatibilité radioélectrique dans les études initiales. Le GSM et l'UMTS en sont de bons exemples : de nombreuses études préalables ont montré les limites de compatibilité de ces systèmes (entre eux ou avec d'autres systèmes). Le problème des nouveaux systèmes de radiocommunication aéronautiques va également se poser ; en effet, les systèmes civils sont encore des systèmes analogiques à modulation d'amplitude et fonctionnent actuellement en VHF (118 - 135 MHz). Ils sont donc très sensibles au bruit et aux brouillages.

En 2007 un accord cadre a été établi entre le DRÉ et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC/DSNA) concernant des études dans le domaine de la compatibilité des nouveaux systèmes (en partenariat avec le département Télécommunications de Supélec) et la création (à partir de 2009) d'un laboratoire d'évaluation de la compatibilité des systèmes aéronautiques de nouvelle génération. Ces études, qui devraient faire l'objet d'un doctorat, sont de deux types. Le premier concerne l'étude comparative des paramètres de codage d'information nécessaires, de la meilleure modulation et de la technique d'accès (typiquement des normes de type GSM ou OFDM, ou des variantes possibles comme une association OFDM pour la liaison sol - avion et GSM pour la liaison avion - sol). Le second est relatif à la compatibilité électromagnétique tant avec les moyens de radionavigation classique dans la bande L aéronautique (la bande 960-1215 MHz qui concerne les radio-transpondeurs DME (*Distance Measuring Equipment*), les radars secondaires et les systèmes d'anticollision), qu'avec d'autres systèmes tels que le dispositif de communications mobiles tactiques de la Défense (JTIDS/MIDS), les équipements de navigation par satellites dans la bande 1164-1215 MHz, ainsi que les équipements de télécommunications mobiles UMTS et GSM en dessous de 960 MHz.

3.2.2 Vers de nouvelles applications pour les chambres réverbérantes

La modélisation et l'analyse du fonctionnement d'une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) sont les composantes d'une activité de recherche soutenue au sein du DRÉ. En plus des études décrites dans la présentation de ce domaine d'activité, nous nous intéresserons à un aspect fondamental du fonctionnement d'une CRBM : celui

de la fréquence la plus basse à laquelle ce dispositif est susceptible de fonctionner. Il est bien connu qu'aux basses fréquences, le nombre de modes excités n'est plus suffisant pour assurer l'homogénéité statistique requise pour le champ dans la cavité. Une solution serait d'augmenter les dimensions de la chambre afin qu'à ces fréquences le nombre de modes excités devienne significatif. Des problèmes d'emplacement et de coût rendent cette approche peu attrayante. D'autre part, comment faire avec une CRBM existante ? Dans le cadre d'une collaboration avec un organisme du Ministère de la défense de Singapour (le DSO) et le laboratoire franco-singapourien SONDRÀ à Supélec, une approche originale sera mise en œuvre afin d'apporter une solution à ce problème. Il s'agit, au moyen d'une répartition appropriée d'antennes dans une CRBM donnée, de modifier les conditions aux limites sur les parois de la chambre afin qu'elle se comporte comme si elle était de plus grandes dimensions. Une modélisation rigoureuse sera réalisée afin de prédire le comportement de la CRBM ainsi modifiée, et sera associée à des expérimentations aussi bien au DRÉ qu'au DSO. Parallèlement, aidés en cela par nos projets d'équipement en moyens de mesure dans le domaine temporel décrits précédemment, nos travaux s'orientent vers le retournement temporel, une technique aujourd'hui bien maîtrisée qui permet d'exploiter les propriétés réverbérantes du milieu de propagation pour améliorer la qualité d'une transmission ou se focaliser sur un diffracteur identifié. Le cas de la cavité résonante qu'est la chambre réverbérante est, en électromagnétisme, le cas idéal pour appliquer le retournement temporel ; la technique peut être vue, dans le domaine fréquentiel, comme la superposition en phase de tous les modes au point d'intérêt.

3.3 Problèmes inverses des ondes

Pour 2010-2013 notre action dans le champ thématique de l'inversion et de l'imagerie électromagnétique continuera de s'inscrire au foyer de coopérations multiples sur le plateau de Saclay (avec la part clé que prend le RTRA Digiteo) aussi bien qu'à l'échelle européenne (avec des actions franco-italienne, -hongroise, -espagnole, -grecque, -suédoise et le réseau informel SAMBA). L'essentiel des travaux à venir est déjà inscrit en filigrane dans les travaux présents, pour des raisons qu'il nous semble nécessaire d'indiquer avant de nous intéresser aux points clés des sujets qui seront traités. Il faut noter que nos financements contractuels à longue échéance restent limités sur des sujets de "niche".

3.3.1 Le contexte coopératif

C'est flagrant en contrôle non destructif de structures industrielles, par exemple, où notre offre ne peut trouver preneur qu'à long terme au vu de la technologie effectivement disponible et des modalités de mise en œuvre actuelles de ce contrôle, impliquant souvent des processus d'agrément longs, comme dans le nucléaire. C'est encore plus le cas pour ce qui concerne le contrôle intégré de structures composites de l'aéronautique (dans le domaine des longueurs d'onde centimétriques) où même la possibilité d'une interrogation pertinente de ces structures demeure incertaine malgré les vifs besoins exprimés dans ce domaine. C'est toujours le cas en investigation du sous-sol proche où les outils adéquats (dans le domaine des longueurs d'ondes métriques) sont encore de l'ordre du prototype, tels ceux développés actuellement par le BRGM. Cela est vrai aussi en imagerie micro-onde de structures biologiques d'échelles et comportements variés dans le domaine centimétrique à millimétrique où un intérêt considérable (ré)apparaît au niveau académique européen, mais où il semble difficile de trouver des partenaires en aval. Finalement, si l'interrogation "Ondes et imagerie" est présente à la MRIS-DGA, il reste à harmoniser nos expertises et ses besoins, ce qui n'est pas simple au delà de la prise de positions de principe. Compte tenu de ce qui précède, nous nous inscrivons dans une perspective déjà bien dessinée.

Cela tient aux engagements pris : on mettra en avant, en exemple typique, la signature récente d'un "mémorandum de compréhension" avec le CEA, mémorandum couvrant les développements que le laboratoire et nombre d'autres intervenants académiques européens entendent mener avec le CEA LIST dans le cadre du projet CIVA 2012 (CIVA étant la plate-forme logicielle multi-modalité de référence de modélisation du contrôle non-destructif que propose le CEA et à laquelle le laboratoire a déjà contribué via le travail de plusieurs doctorants et post-doctorants et l'action de maturation technologique ONDES-IN de Digiteo).

Cela vaut par les projets que financent l'ANR, le RTRA Digiteo et le pôle de compétitivité System@tic. On notera ainsi le projet INDIAC (ANR, Réseau national de technologies logicielles, 2008 - 2011) sur les bases de données adaptatives (avec le bénéfice d'une année post-doctorale), le projet GAOBD (financement Digiteo) de thèse de doctorat en co-tutelle franco-hongroise avec l'université de technologie et d'économie de Budapest (BUTE) qui débute en octobre 2008 et qui accompagne, en amont au moins, ledit INDIAC (que complétera si tout va bien une action intégrée BALATON, à laquelle nous nous sommes portés candidats de concert avec le LGEP côté français) et le projet IMRI (financement Digiteo) d'une année de post-doctorat conjoint avec le CMAP sur l'imagerie MUSIC en régime impulsif à compter de l'automne 2008.

Cela s'explique évidemment par les thèses de doctorat en cours : l'une (à échéance au printemps 2009) sur l'imagerie non itérative de fissures minces menée avec le CMAP et l'autre (à échéance à l'automne 2010) dans le cadre du projet CAPVERS (financement Digiteo) sur la conception optimale de réseaux de transducteurs en ultrasons. Il en est de même pour les thèses qui débutent : l'une sur la conception optimale de systèmes de sondes à base de

magnéto-résistances géantes (GMR) en courants de Foucault à compter d'octobre 2008 (avec un financement CEA LIST), ou sont en discussion avancée. Ainsi, si une thèse en co-tutelle franco-italienne avec l'université de Trente et son laboratoire ELEDIA se termine en fin d'année 2008, une seconde se prépare avec le même laboratoire et la même université pour un début effectif à l'automne 2009 (toutes deux sur l'imagerie micro-onde adaptative).

Cela se justifie par les actions menées ou engagées, qu'illustrent, pour les premières, la coopération avec l'université de Patras sur la diffraction électromagnétique basse-fréquence par des structures enfouies en milieu diffusif, ou avec l'université Carlos III de Madrid sur les méthodes d'évolution contrôlée d'ensembles de niveaux, et dont témoignent, pour les secondes, les discussions avec l'université nationale de Singapour (NUS) concernant une action intégrée sur l'imagerie rapide de matériaux complexes, qui devrait être déposée en 2009, et une possible thèse financée dans le cadre des accords de coopération établis entre NUS et Supélec.

Cela est aussi induit par notre investissement dans System@tic, car, même si le financement post-doctoral dans le cadre du projet ON-TRAC sur la caractérisation électromagnétique des composites se conclut en octobre 2008, nous y participons jusqu'à échéance mi-2009 et toute poursuite ne pourra qu'être positive.

Signalons que le GDR ONDES (dirigé du laboratoire depuis 2006) et son groupe thématique 3 "Imagerie et inversion" (co-animé du laboratoire depuis 2002) ne sont pas sans impact au jour le jour, par les apprentissages qu'ils permettent et les liens tissés ; le soutien du laboratoire et de Supélec (en ce qui concerne le Club des partenaires) sont d'ailleurs déterminants dans la menée de ce GDR.

3.3.2 Les objectifs et les points clés

Pour résumer nos quatre années à venir, il s'agit de développer des techniques d'inversion et d'imagerie novatrices, non nécessairement réduites à des incréments de méthodes existantes. Notons cependant qu'il existe des approches, telles celle de gradient modifié sous contraintes de binarité, qui, développées dans des situations académiques bi-dimensionnelles à la fin des années 1990, connaissent des avancées significatives dans des cas applicatifs tridimensionnels du contrôle non destructif de structures industrielles en courants de Foucault. On pourrait dire la même chose des évolutions contrôlées d'ensembles de niveaux, qui, pionnières à la même époque, sont développées dans ce même contexte aujourd'hui. Il en est de même pour les méthodes d'inversion bayésiennes développées en collaboration avec la division Signaux depuis 2005 pour des applications en imagerie micro-onde. L'intérêt de ces méthodes est qu'elles permettent d'incorporer, au sein du processus de reconstruction, l'information structurelle disponible, ce qui conduit à des reconstructions plus stables, plus sûres et plus efficaces dans le cas de données bruitées et/ou en petit nombre. Le but est ainsi d'obtenir exactement l'information requise au lieu de gaspiller données et ressources afin de confirmer une information structurelle déjà disponible, sans requérir une connaissance détaillée de chacune des propriétés caractéristiques (taille, forme, propriétés physiques, texture). Des situations de ce type apparaissent dans de nombreuses applications auxquelles nous nous intéressons, qui peuvent être caractérisées par des mots clés "traditionnels" tels que : objets complexes 3-D volumétriques et surfaciques, matériaux dispersifs hétérogènes complexes, modèles hybrides de propagation et d'interaction, caractère aléatoire ou incertain des environnements, champs proches et couplages forts sources-objets, données d'aspects limités (en contenu informationnel, géométrie, fréquence, phase), non-linéarité et caractère mal-posé des inversions.

Nous considérons ces situations d'un point de vue mathématique, numérique et orienté vers l'application. Quatre points durs apparaissent alors. Il s'agit :

- i) de comprendre la physique de l'interaction des ondes avec des structures artificielles ou naturelles de grande complexité physique et géométrique, affectées de perturbations variés et probablement évolutives, observées par des sources et capteurs à des échelles d'auscultation allant du sub-millimétrique (voire en deçà) au métrique (voire au delà) ;
- ii) de réduire le coût, d'accroître l'efficacité, d'atteindre une meilleure sûreté ou un meilleur diagnostic, d'assurer une meilleure prédiction de comportement et une meilleure maintenance en construisant une "maquette numérique", ce qui s'effectue par des outils de modélisation et de simulation mis en œuvre, par exemple en contrôle non destructif, dès le stade de la conception ;
- iii) de concevoir des systèmes d'acquisition qui soient électroniquement agiles et évidemment multi-éléments afin d'assurer l'obtention d'une masse de données suffisante en un temps restreint, en limitant entre autre les déplacements mécaniques, ce qui réduit les erreurs et les pertes de temps ;
- iv) de déchiffrer des signaux complexes, le but étant de les rendre intelligibles et pertinents par le développement d'inversions élaborées, robustes, rapides, générales ou dédiées, validées en prenant en compte la réalité des moyens d'inspection, ce qui exige une aide à la décision appropriée et un retour d'expérience.

Ceci implique toujours mise en synergie d'outils d'analyse théorique, de modélisation, de simulation, d'inversion et de mesure, cette mise en synergie étant validée, éclairée et initiée par la situation de terrain. Cela nécessite des ponts convenables entre disciplines variées : mathématiques appliquées (industrielles), théorie, modélisations et simulations électromagnétiques et élastiques, traitement du signal et de l'image, mesures et instrumentation, science des matériaux, méthodes de synthèse et mise en œuvre de dispositifs.

Deux exemples significatifs

Mettons en avant, par un choix délibéré, deux sujets exemplaires, parmi nombre qui le sont tout autant :

- i) l'optimisation adaptative de bases de données discrètes afin de déterminer la réponse de sondes à des "perturbations" modélisées en un environnement donné et de déterminer ces perturbations à partir de la réponse mesurée de sondes en un environnement supposé, sachant qu'il est possible d'extraire de l'information de la structure et de la géométrie de la base optimisée, (meta-)information concernant la qualité de l'inversion, la capacité du système de mesure, le caractère adéquat des modèles choisis,
- ii) l'imagerie électromagnétique non-itérative rapide de collections de "petites" hétérogénéités affectant des milieux variés à partir de données d'aspect limité recueillies en régime impulsionnel ou multi-harmonique. En harmonie avec les développements les plus récents de sources et capteurs, notamment dans le domaine du contrôle non-destructif en courants de Foucault, dans celui de l'exploration de sous-sols proches, et en imagerie tomographique du vivant (électrique, électromagnétique), ce thème s'affiche en approfondissement, voire rupture (le cas impulsionnel), des investigations reconnues des partenaires en s'appuyant sur une mathématique innovante (comprenant et dépassant en particulier l'habituel retournement temporel) et en incorporant des développements logiciels conséquents afin d'associer la vitesse et la robustesse de l'imagerie mise en œuvre.

Ces exemples, tous deux inscrits au premier rang dans Digiteo, témoignent du rang international des travaux menés sur cette thématique au laboratoire, une fois soulignés l'action commune avec le CEA LIST dans CIVA 2012, les liens forts avec le LGEP voisin et l'université hongroise de BUTE, pour le premier, et l'enracinement de la relation bilatérale avec le CMAP, avec des incorporations possibles dans CIVA 2012, des développements de type DGA espérés et des actions franco-singapouriennes probables, pour le second.

Publications du L2S pendant la période de référence

- [A.05.S.01] O. Féron et A. Mohammad-Djafari. Image fusion and unsupervised joint segmentation using HMM and MCMC algorithms. *Journal of Electronic Imaging*, 14(2) :023014–1, 023014–12, avril–juin 2005.
- [A.05.Y.01] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. Microwave imaging of inhomogeneous objects made of a finite number of dielectric and conductive materials from experimental data, special section : Testing inversion algorithms against experimental data : inhomogeneous targets, K. Belkebir and M. Saillard Eds. *Inverse Problems*, 21(6) :S95–S115, décembre 2005. Contribution invitée.
- [A.06.S.01] S. Moussaoui, C. Carteret, A. Mohammad-Djafari, O. Caspary, D. Brie et B. Humbert. Separation of non–negative mixture of non–negative sources using a Bayesian approach and MCMC sampling. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 54(11) :4133–4145, november 2006.
- [A.07.S.01] A. Mohammad-Djafari. Bayesian inference for inverse problems in signal and image processing and applications. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 16 :209–214, 2007.
- [A.08.S.01] A. Mohammad-Djafari. Super–resolution : A short review, a new method based on hidden Markov modeling of HR image and future challenges. *The Computer Journal*, 2008. On line version available, doi :10.1093/comjnl/bxn005.
- [C.05.S.01] N. Bali et A. Mohammad-Djafari. Approximation en champ moyen pour la séparation de sources appliqué aux images Hyperspectrales. *20ème Colloque du GRETSI*, volume 2, actes : pages 1061–1064, septembre 2005.
- [C.05.S.02] M. Ichir et A. Mohammad-Djafari. A mean field approximation approach to blind source separation with L_p priors. *European Signal Processing Conference (Eusipco)*, Antalya, Turkey, 2005.
- [C.05.Y.01] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. Approche bayésienne pour la reconstruction en tomographie micro–onde : cas de l’objet constitué d’un nombre fini de matériaux diélectriques et/ou métalliques. *Réunion Générale Interférences d’Ondes, GDR ONDES*, actes : page 82, novembre 2005.
- [C.05.Y.02] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. Reconstruction d’objets composés de plusieurs matériaux en tomographie micro–onde. *vingtième colloque du GRETSI*, actes : pages 635–638, Louvain–la–Neuve (Belgique), septembre 2005.
- [C.06.Y.01] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. Approche bayésienne pour un problème inverse de reconstruction en tomographie micro–onde. *Imagerie optique non conventionnelle*, actes : pages 635–638, GdR ISIS, Thème B – Image et Vision, Paris, mars 2006.
- [C.06.Y.02] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. A Bayesian approach to microwave imaging of hybrid targets. *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS’2006)*, actes : page 454, Cambridge, USA, mars 2006.
- [C.07.S.01] A. Mohammad-Djafari. Approche variationnelle pour le calcul bayésien dans les problèmes inverses en imagerie. *Colloque du GRETSI*, actes : pages 1229–1232, Troyes, France, septembre 2007.
- [C.08.S.01] H. Ayasso et A. Mohammad-Djafari. Variational Bayes with Gauss–Markov–Potts prior models for joint image restoration and segmentation. *Int. Conf. on Computer Vision and Applications*, actes : pages 571–576, Funchal, Madaira, Portugal, janvier 2008.
- [L5.05.Y.01] O. Féron, B. Duchêne et A. Mohammad-Djafari. Microwave imaging : characterization of unknown dielectric or conductive materials. In K.H. Knuth, A.E. Abbas, R.D. Morris et J.P. Castle eds., *Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering*, volume 803, pages 231–238. American Institute of Physics, 2005.
- [T.06.Y.01] O. Féron. *Champs de Markov cachés pour les problèmes inverses : application à la fusion de données et à la reconstruction d’images en tomographie micro–onde*. Thèse de doctorat, Université Paris–Sud, Orsay, novembre 2006.