

Département Méthodes pour l'Ingénierie des Systèmes (MIS)

Fiche MIS 1 : Méthodes et outils multi-échelles pour l'analyse et la commande des systèmes multi-physiques .	20
Fiche MIS 2 : Méthodes et Outils pour la Conception et la Commande Robuste de Système.....	22
Fiche MIS 3 : Diagnostic, pronostic et supervision	24
Fiche MIS 4 : Identification, Observation & Capteurs Logiciels.....	26
Fiche MIS 5 : Commande et gestion d'énergie de systèmes mono ou multi-sources	28
Fiche MIS 6 : Amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes de stockage de l'énergie.....	30
Fiche MIS 7 : Robotique médicale, apprentissage et assistance des gestes médico-chirurgicaux	32

Activités Inter-Départements

EE et MIS :

Fiche <i>inter</i> 1 : Compatibilité Électromagnétique des Convertisseurs d'Électronique de Puissance	35
Fiche <i>inter</i> 2 : Commande en électronique de puissance pour la gestion d'énergie.....	37

Bio et MIS :

Fiche <i>inter</i> 3 : Modélisation, dosimétrie numérique des champs électromagnétiques	40
---	----

Département Méthodes pour l'ingénierie des systèmes

Fiche MIS 1 : Méthodes et outils multi-échelles pour l'analyse et la commande des systèmes multi-physiques

S. Sesmat, J. Joly, D. Eberard, M. di Loreto, L. Krähenbühl, W. Marquis-Favre, E. Bideaux

A. Résumé

L'objet de cette activité de recherche est d'explorer et de proposer de nouvelles approches en modélisations multi-échelle pour l'analyse du comportement dynamique de systèmes multi-physiques (mécaniques, électriques, fluidiques, thermiques, ...). Les différentes échelles peuvent être spatiale (du local au macroscopique) ou temporelle (de la milliseconde à plusieurs années). L'ensemble des travaux vise une formulation du comportement permettant d'optimiser le dimensionnement du système physique ou de conduire la synthèse d'une commande ou d'un observateur. Ces travaux contribuent au développement d'approches théoriques de construction de modèle (C-1), de méthodes de résolution par couplage des différentes échelles (C-2) et s'appuient sur des démarches expérimentales (C-3). Ils sont mis en œuvre pour répondre à différents enjeux scientifiques et technologiques (C-4).

Mots clés : Modélisation multi-échelle, Bond Graph, Systèmes multi-énergie, Fluidique, Théorie de la commande

B. Introduction contexte

Les enjeux environnementaux conduisent à développer des systèmes à forte efficacité énergétique en s'appuyant sur des technologies en rupture ou un pilotage plus efficace. Toutefois, les approches sont souvent séquentielles et ne considèrent qu'un aspect du problème à chaque étape : optimisation d'un composant, d'un écoulement, d'une commande ... Ainsi l'optimisation de l'écoulement dans une vanne peut réduire une dissipation naturelle qui était très utile pour la stabilité de l'organe de commande ; la commande/gestion optimale d'un point de vue énergétique d'un véhicule électrique peut avoir des conséquences négatives sur le vieillissement du système de stockage de l'énergie électrique ! L'émergence de nouveaux outils permettant d'aborder ces problématiques de manière plus globale constitue de ce fait un enjeu important.

C. Description activité

Nous abordons cette question sous deux angles : d'une part au travers de recherches méthodologiques, comme la prise en compte de phénomènes localisés dans l'espace, et leur intégration fidèle dans des modèles macroscopique (C-1 et C-2) ; d'autre part via des applications en fluidique (C-3) ou pour une gestion rationnelle de l'énergie (C-4).

1. Schéma de discrétisation conservatifs en énergie

Dans le cadre de l'ANR [AIDS](#) sur l'approximation de systèmes de dimension infinie, nous avons abordé la synthèse de schémas de discrétisation en temps pour des systèmes algébro-différentiels. En exploitant une formulation port-Hamiltonienne et des intégrateurs énergétiques pour des systèmes

entrée-sortie, nous avons proposé de nouveaux schémas de discrétisation conservatifs en énergie, dans un premier temps pour des systèmes algébro-différentiels en dimension finie (à paramètres localisés). Cette approche a ensuite été généralisée au cas de systèmes en dimension infinie, régis par des équations aux dérivées partielles, par le biais d'une semi-discrétisation en espace et en temps, conservative en énergie.

Ces schémas de discrétisation ont ensuite été appliqués à la simulation numérique, à l'analyse de systèmes conservatifs régis par des équations aux dérivées partielles hyperboliques du 1^{er} ordre, et à la synthèse de lois de commande. Ils présentent l'avantage de garantir la conservation de propriétés intrinsèques, telles que la passivité ou l'énergie. Ils répondent aux besoins de la simulation numérique ou de la conception de lois de commande, qui sont basées sur les propriétés d'évolution interne de l'énergie transitant dans des systèmes via leurs interconnexions.

2. Couplage approches locales et modélisation système

Dans le cas idéal, la conception et l'optimisation des systèmes doivent être étudiées en analysant simultanément les performances aux niveaux local et macroscopique. Cependant, certaines physiques sont trop coûteuses en temps de calcul pour être directement intégrées à une boucle d'optimisation, ou de simulation de la dynamique. L'étude de la sensibilité paramétrique, comme problème combinatoire, implique des temps de calcul très élevés.

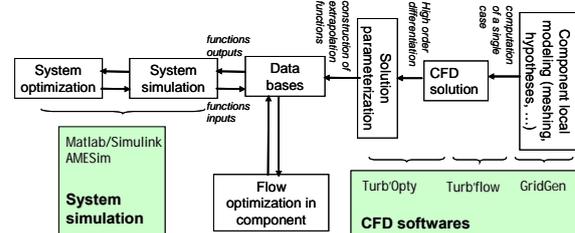


Fig.1 : Paramétrisation en CFD pour la simulation système et l'optimisation.

Dans le cadre du projet [CINEMAS²](#), nous avons appliqué une nouvelle approche basée sur le paramétrage de la solution CFD (Computational Fluid Dynamics) calculée via une approximation polynomiale des équations de Navier-Stokes complètes autour d'un point de référence. Ce procédé est particulièrement efficace pour prendre en compte les changements de la géométrie ou des conditions aux limites, et facilite le couplage avec la simulation macroscopique du système (Fig.1). Ce paramétrage permet d'intégrer les résultats de CFD à une boucle d'optimisation couplant performances stationnaires et dynamiques (lois de commande).

3. Caractérisation spatiale d'un écoulement en régime instationnaire

Face aux actionneurs électriques, l'efficacité de la transmission de l'énergie fluide est fortement pénalisée car le principe de la commande est le contrôle d'une perte de charge (valve). En génie électrique, le principe des convertisseurs de puissance repose sur des composants on/off à haute fréquence de commutation, ce qui limite les pertes essentiellement aux phases de commutation. Le développe-

ment de composants fluidiques de puissance *miniatures* (une centaine de cm^3) à *commutation rapide* (inférieure à la milliseconde) est donc un enjeu important. De plus, des applications hautes fréquences se développent aussi dans des secteurs comme le transport, l'alimentaire, ou le tri des déchets.

L'émergence de ces technologies en rupture rend nécessaire le couplage d'outils issus de la mécanique des fluides, de l'électromécanique et de l'automatique afin d'atteindre des performances stationnaires et dynamiques adéquates. Le laboratoire s'est appuyé sur les outils présentés plus haut pour concevoir ou spécifier des composants fluidiques haute fréquence. Cependant à ces fréquences, les phénomènes locaux dans l'écoulement deviennent prépondérants et leur dynamique n'est plus négligeable devant les temps de réponse mécaniques.

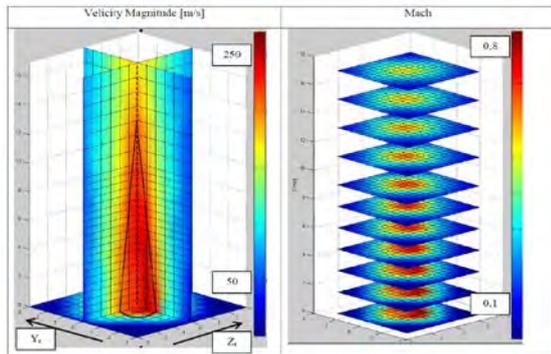


Fig.2: Caractérisation expérimentale d'un jet d'air en conditions stationnaires.

La prise en compte de la forme et du temps d'établissement de l'écoulement constituent un paramètre caractéristique important de l'efficacité du composant. On est ici à la limite des connaissances en mécanique des fluides, et la modélisation numérique doit s'appuyer sur de nouveaux équipements pour la validation expérimentale des modèles. Pour illustrer ces travaux, une cartographie spatiale d'un jet d'air obtenue expérimentalement est présentée (Fig. 2); l'équipement du laboratoire permet d'obtenir une résolution temporelle des phénomènes jusqu'à des fréquences de 1.6 kHz.

4. Commande optimale multi-échelle des véhicules électriques

Dans le domaine de la recherche d'une meilleure efficacité énergétique des véhicules routiers ou automobile, la recherche s'est souvent focalisée sur la modification de l'architecture. Le laboratoire s'est intéressé à d'autres voies, qui visent à améliorer autrement les performances de ces systèmes hybrides, par exemple par une utilisation aux meilleurs points de rendement/émission de polluants, une gestion plus intelligente des stockages d'énergie, la prise en compte du vieillissement des composants, l'interaction avec l'utilisateur.

Ces approches globales s'appuient évidemment sur une bonne compréhension de ces systèmes hybrides et des flux d'énergie entre les différentes physiques, mais aussi sur différentes méthodes d'optimisation multi-physiques et multi-échelles permettant soit d'évaluer le potentiel en termes de gain énergétique (optimisation hors ligne), soit de synthétiser les commandes optimales à mettre en œuvre (optimisation en ligne).

Cette démarche a été appliquée par exemple pour le développement d'un Advanced Driver Assistance System pour l'éco-conduite des véhicules thermique, électriques et hybrides avec prise en compte des émissions de polluants [thèse [Mensing](#)], ou encore la commande d'un véhicule à pile à combustible garantissant une gestion optimale de l'énergie en respectant les contraintes de vieillissement de la pile pour une durée de vie de 5000h [thèse [Da Fonseca](#)]. Nous abordons également la gestion de la consommation des auxiliaires d'un véhicule, problème qui se rapproche de la gestion d'un smart grid.

Ces recherches considèrent la forme générique des problèmes et développent des outils originaux articulant différentes approches (programmation dynamique, principe de Pontryagin, optimisation convexe, Branch & Bound, théorie des jeux, ...).

D. Positionnement, collaborations et partenariats

- ✓ Travaux méthodologiques et appliqués.
- ✓ Originalités :
 - point de vue adopté pour dimensionner /optimiser/commander des systèmes complexes et multi-physiques avec vaste échelle de temps et d'espace,
 - domaine d'application particulier (fluidique).
- ✓ Collaborations académiques : réseau [FPCE](#) ; [Institut C. Ader](#), Laboratoire [Roberval](#) ; LMFA, CETHIL, LAMCOS, LAGEP, IFSTTAR.
- ✓ Partenariats industriels : Volvo Trucks, Volvo CE, Plastic Omnium, Renault, PSA, Sherpa Engineering, Asco-Joucomatic, Moog, ...

E. Faits marquants

- ✓ Electrovanne pneumatique pour la génération de jets. Commutation en 0.5 ms pour 100 NI/mn à 6 bars ; actionnement réalisé par AMF magnétique [*brevet ASCO déposé en 2014*].
- ✓ Contrôle de la traînée aérodynamique des véhicules (Fig.3) [*projet ANR déposé*].



Fig.2: Recollement de l'écoulement par jet pulsé (150 Hz).

F. Références

- [1] F. Mensing, E. Bideaux, *et al.*, "Eco-driving: An economic or ecologic driving style?", *Transportation Research Part C*, 38 pp. 110-121, 2014
- [2] R. Da Fonseca, E. Bideaux, B. Jeanneret, M. Gérard, M. Desbois-Renaudin, A. Sari, "Energy management strategy for hybrid fuel cell vehicle", *ICCAS'2012*, Corée
- [3] Y. Xu, E. Bideaux, S. Sesmat, J.-P. Simon, "Dynamic Effect of the Intermediate Block in a Hydraulic Control System", *JMEA* 2, 6 pp. 184-193, 2012
- [4] E. Bideaux *et al.*, "Drag reduction by pulsed jets on strongly unstructured wake: towards the square back control", *IJAD* vol. 1, n°3/4, pp.282-298, 2011
- [5] S. Aoues, D. Eberard, W. Marquis-Favre, "Canonical Interconnection of discrete linear port-Hamiltonian systems", *CDC* 2013, Florence, Italy.

L. Bako, E. Bideaux, X. Brun, M. Di Loreto, D. Eberard, J. Huillery, A. Kornienko, W. Marquis-Favre, P. Massioni, R. Moreau, G. Scorletti, M. Smaoui, D. Thomasset, J.-F. Trégouet

A. Résumé

Cette activité développée au laboratoire Ampère concerne le développement de méthodes et d'outils pour répondre aux besoins toujours plus contraignants de performance des systèmes dynamiques. Elle est centrée sur l'Automatique pour l'analyse, la conception et la conduite de systèmes complexes. Cette activité amont, fortement liée aux champs applicatifs développés au sein du laboratoire Ampère, s'appuie sur une synergie de différentes approches afin de répondre au mieux aux problématiques posées, qui sont de natures différentes. Les méthodes développées et les cadres théoriques choisis ont comme ligne directrice de garantir un bon compromis entre leur conservatisme, leur complexité algorithmique et leur adéquation pour leur exploitation aux domaines applicatifs visés.

Mots clés : Analyse de performance, Optimisation convexe, Analyse structurelle, Inversion, Robustesse, Conception de systèmes commandés

B. Introduction/contexte

Les enjeux industriels actuels induisent une conception en un temps réduit de systèmes d'une grande complexité, et garantissant un haut niveau de performance et d'efficacité énergétique. Les systèmes abordés par les champs applicatifs du laboratoire Ampère présentent ces caractéristiques. Ils sont en effet multi-physique (mécatronique, génie électrique, biologie), tout en incluant des aspects non linéaires et/ou commutés, distribués/décentralisés, à grande échelle, ou encore de dimension infinie. Pour répondre à ces enjeux, il est nécessaire de développer des méthodes efficaces permettant de poser un cahier des charges, le valider et le satisfaire en exploitant des modèles suffisamment simplifiés.

Les travaux de recherche menés au laboratoire Ampère visent à développer ces nouvelles méthodes en abordant les différentes étapes fondamentales de la conception d'un système : modélisation (approximation et incertitude), choix d'une architecture (approche structurelle), détermination paramétrique de sous-systèmes et dimensionnement (approche entrée-sortie), aide à la rédaction de spécifications. Ces méthodes sont avant tout motivées par leur intégration dans les processus de conception mécanique, électrique, électronique et biologique. De par l'hétérogénéité des spécifications d'un cahier des charges (performances) et des différentes étapes de la

conception, l'originalité des travaux réalisés consiste à effectuer une synergie entre différentes approches : modélisation inverse et bond graph, commande robuste et performance non linéaire, optimisation convexe et systèmes décentralisés/grande échelle, systèmes distribués et systèmes à retard. Ces synergies s'appuient sur des méthodes et outils performants pour des familles de modèles définis par des représentations simplifiées et construites de façon à contenir le modèle complexe de départ.

C. Description activité

1. Analyse de performance pour le cahier des charges

Modélisation inverse et analyse de performance

Cette activité vise à développer, par le biais de procédures graphiques de vérification structurelle et comportementale sur les représentations bond graph, des méthodes de conception. L'originalité des travaux est l'exploitation de la modélisation inverse, qui, par les outils de la bicausalité, de l'analyse structurelle pour la commandabilité et du découplage entrée-sortie, permet de vérifier l'adéquation à des spécifications d'un modèle de conception ou d'un modèle de composant, à sélectionner ou à concevoir [2], [hal-00476283]. Des procédures algébriques ont également été développées pour l'inversion générique de systèmes LTI [hal-00805593].

Analyse de la performance non linéaire

La norme H infini pondérée a fondé l'analyse de spécifications en poursuite, régulation, synchronisation pour les systèmes linéaires stationnaires. L'originalité de nos travaux est de l'étendre aux systèmes non-linéaires en se fondant sur le gain incrémental L_2 , ce que ne permet pas le gain L_2 usuellement utilisé [thèse Hillerin] [hal-00992392].

Analyse de la performance des systèmes de dimension infinie, distribués et à grande échelle

L'enjeu associé à l'analyse de ces systèmes réside dans leur complexité. Elle est abordée en utilisant des méthodes d'optimisation adaptées, en recherchant des structurations de modèles plus appropriées, ou par approximation afin d'obtenir un modèle de complexité réduite doté d'une incertitude dynamique.

L'optimisation convexe a été exploitée en ingénierie inverse appliquée à la Biologie des Systèmes. Afin de déterminer le cahier des charges d'une bactérie en phase de croissance, une modélisation systémique a été développée et sa performance évaluée par programmation linéaire [hal-00753127], [4], [thèse Goelzer].

La structuration de modèles a été exploitée pour des systèmes multi-agents (interconnexion de sous-systèmes identiques) pour l'analyse de réseaux d'oscillateurs soumis à des spécifications réalistes [thèses Zarudniev, Kornienko].

La détermination d'un modèle d'approximation de complexité réduite est explorée pour l'analyse de la performance de systèmes de grande dimension, et de systèmes à paramètres répartis. Les contributions sous-jacentes concernent la propagation des contraintes quadratiques intégrales pour l'analyse hiérarchisée [[hal-00793948](#)], [[hal-00684302](#)], ou la réalisation de systèmes à retards distribués [3] pour l'approximation de systèmes à paramètres répartis [[hal-00957352](#)].

2. Outils de synthèse pour la conception de systèmes performants

Synthèse de systèmes distribués et de grande dimension

Les travaux ont porté sur la commande d'un agent ou sur leur interconnexion pour garantir la performance globale d'un système multi-agents en se basant sur la représentation LFT et sur l'optimisation convexe (IQC). Ces techniques ont été appliquées à la conception d'un réseau de PLL (boucles à verrouillage de phase) validé expérimentalement [[thèse Kornienko](#)], [5], [[hal-00550425](#)], et à la conception d'un réseau d'oscillateurs spintroniques [[th. Zarudniev](#)], [[hal-00871119](#)], [[hal-00673955](#)].

Commande en performance des systèmes non linéaires

La commande LPV (linéaire à paramètres variants) vise à améliorer la commande par séquençage de gains des systèmes non linéaires. Constatant qu'elle ne garantit pas des spécifications importantes de performance, nous avons proposé une nouvelle approche de la commande LPV basée sur un critère incrémental gain L_2 afin de les garantir [1]. Elle permet la synthèse d'un correcteur avec des garanties de performance robuste et de coût énergétique [1], [[th. Hillerin](#)], [[hal-00651979](#)].

Synthèse de systèmes en présence de variations paramétriques et dynamiques

Des travaux sont développés autour de l'évaluation de l'ensemble des paramètres d'un système qui réalise un certain niveau de performance défini par un cahier des charges.

Une première problématique (synthèse de tolérances) est, étant donné un cahier des charges et un jeu de paramètres pour lequel le système le satisfait, de déterminer les variations maximales des paramètres (tolérances) telles que le cahier des charges soit satisfait. Une première approche a été développée dans le cas de spécifications temporelles en se basant sur une représentation bond graph et la logique floue, dans un contexte probabiliste [[hal-00799531](#)]. Une seconde approche a été développée dans le cadre du contrôle actif des vibrations mécaniques pour la satisfaction de spécifications fréquentielles [[hal-00839744](#)], [[hal-00859441](#)], [[thèse Zhang](#)].

Une seconde problématique (analyse de la performance robuste) est, étant donné un ensemble de paramètres du système, évaluer le niveau de performance fréquentielle satisfait par le système.

Elle peut être efficacement abordée par l'analyse de la robustesse basée sur la représentation LFT et sur l'optimisation convexe (IQC). Les travaux ont porté sur son intégration dans la conception de filtres CEM (voir [fiche MIS/EE 1](#)), en exploitant le formalisme graphique circuit électrique.

Une troisième problématique est la synthèse de la performance robuste. Une partie des paramètres du système étant fixée mais incertaine, il s'agit alors de déterminer les autres paramètres pour satisfaire un niveau de performance, en présence d'incertitudes dynamiques. Des solutions pour une classe de systèmes dit «boucle ouverte» ont été proposées [[thèse Bayon](#)], [[hal-00793954](#)], [[hal-00734571](#)], et appliquées à l'observation robuste (voir Activité IV) et à la commande par anticipation pour l'impression jet d'encre [[hal-00655805](#)].

D. Positionnement, collaborations et partenariats

- ✓ positionnement : méthodes pour l'analyse de performance de systèmes complexes, en vue de leur intégration métier
- ✓ collaborations : MIG INRA (1.2, 1.3 et 2.2), DCSC TU Delft (2.3), Cinvestav (1.3), CEA LETI (1.2, 1.3 et 2.1), LTDS (2.3), Supélec (2.2)
- ✓ partenariats : EDF (1.1), IFPen (1.1), LMS Imagine (1.1 et 2.3), PELAB (1.1 et 2.3)

E. Faits marquants

- ✓ Développement de l'outil BoGiE pour l'analyse structurelle et la simulation de la représentation Bond Graph d'un modèle dynamique
- ✓ Conception d'un réseau de boucles à verrouillage de phase (PLL) et mise en œuvre expérimentale

F. Références

- [1] S. De Hillerin, G. Scorletti, V. Fromion, "Reduced complexity controllers for LPV systems: Towards incremental synthesis", 50th IEEE CDC - ECC, 2011
- [2] M. El Feki, A. Jardin, W. Marquis-Favre, L. Krähenbühl, E. Bideaux, D. Thomasset, "Determination of essential orders from a bond graph model", ASME Journal of DSC, 134, 6, 2012
- [3] H. Lu, M. Di Loreto, D. Eberard, J.P. Simon, "Approximation of distributed delays", Systems & Control Letters 66, 16-21, 2014
- [4] A. Goelzer, V. Fromion, G. Scorletti, "Cell design in bacteria as a convex optimization problem", Automatica 47, 1210-1218, 2011
- [5] A. Kornienko, G. Scorletti, E. Colinet, E. Blanco, J. Juillard, D. Galayko, "Control law synthesis for distributed multi-agent systems: Application to active clock distribution networks", ACC, 2011

E. Boutleux, G. Clerc, H. Razik, L. Piétrac, E. Niel, E. Dumitrescu

A. Résumé

Ces activités de recherche visent à augmenter la durée de vie des systèmes complexes par la maîtrise des phénomènes physiques ou logiques de propagation de fautes. Nos investigations en FDIR (Fiabilité, Diagnostic, Identification, Recouvrement) regroupent l'identification des défauts, leur diagnostic ainsi que les méthodes sûres de conception et de tolérance aux fautes. Les applicatifs concernent les entraînements électriques (actionneurs), les systèmes de contrôle/commande embarqués et l'assistance à la supervision.

Mots clés : Diagnostic, Classification, Pronostic, Vérification Formelle, Synthèse de contrôleurs

B. Introduction/contexte

Les exigences fonctionnelles, structurelles et sécuritaires des systèmes critiques actuels, notamment pour le transport (avionique, ferroviaire, automobile) deviennent de plus en plus drastiques et concurrentielles. Au-delà des caractéristiques de fiabilité inhérentes de ses composants (actionneurs, pré-actionneurs, chaîne de commande), elles conduisent au niveau système (procédure, architecture, codage) au développement de méthodes de conception sûres et prouvables. Ainsi, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement s'impose du composant au système qu'elle relève de la conception ou de l'exploitation. Respectant cette dimension d'investigation du composant au système intuitivement naturelle pour conforter les liens entre le diagnostic et la supervision, nos travaux de recherche ciblent trois activités majeures pour améliorer la sûreté de fonctionnement ; le superviseur, le contrôle/commande, l'actionneur.

Au niveau de la conduite des systèmes, les SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) représentent le moyen le plus commun de surveiller et d'ajuster le comportement déviant. Les actions de recherche visent à optimiser les engagements de ressources et à mettre en cohérence les procédures sécuritaires dans des situations dangereuses. Pour les fonctions de contrôle/commande, si l'électronique embarquée apporte flexibilité (programmable) et souplesse (poids, gabarit), c'est une technologie qui doit répondre à des contraintes d'homologation particulières (Safety Integrated Level SIL) discutées depuis plus d'une décennie et dont les méthodes de conception font encore l'objet d'intenses investigations de recherche.

Au niveau de l'actionneur, la prédiction de défauts consiste à élaborer des signatures pour l'identification des défaillances. Le pronostic de défauts repose sur l'évolution de marqueurs afin de suivre le vieillissement des appareillages/systèmes afin d'anticiper l'apparition de défauts et d'estimer le temps de vie restant (Reste Of Live).

C. Description activité

1. Supervision

Le véritable aboutissement d'un superviseur industriel consiste à assister l'opérateur dans la conduite du process surveillé notamment face à des situations critiques. Certaines procédures sont prescrites pour gérer de telles confrontations, elles se doivent d'être exemptes d'ambiguïté et bien refléter l'objectif industriel.

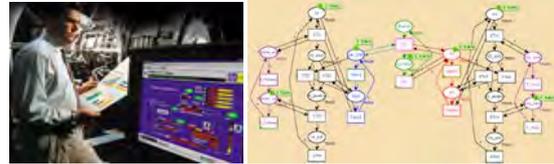


Fig.1. Superviseur et modèle d'états

Verrous scientifiques

Identification des états dangereux à partir de prescriptions textuelles. Evaluation de l'efficacité industrielle, Comportement complexe en cas de simultanéité d'actions.

Propositions

Nous avons développé des méthodes d'assistance à la prise de décision pour l'assurance de la cohérence des protocoles et la configuration des systèmes distribués, basé respectivement sur l'interprétation de procédures BPMN par approches d'états de modèles de réseaux de Petri de haut niveau et une optimisation multicritère à partir de formalisme Max+. Les modèles RdPHN évaluent également la fiabilité dynamique des procédés. Dans le cas d'engagement simultanée de ressources, les automates Max+ ont été étendus pour appréhender la synthèse synchrone.

2. Contrôle/Commande

La supériorité de la logique programmée par rapport à la logique câblée réside dans sa capacité à intégrer de multiples niveaux opérationnels voire d'auto configuration. Cette faculté d'intégration peut cependant induire des erreurs (codage, comportement physique) conduisant à entreprendre des protocoles sécuritaires additionnels.

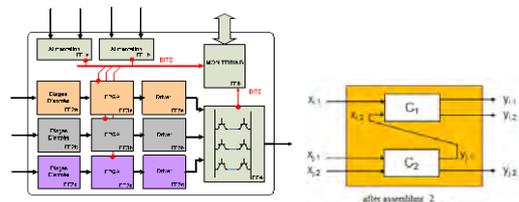


Fig.2. Architecture fiable FPGA 2003 et automates composés

Verrous scientifiques

Le verrou scientifique majeur d'une implantation de systèmes électroniques programmables sûrs réside dans l'explosion combinatoire (passage à l'échelle) des états discrets des systèmes à contrôler.

Propositions

Pour maîtriser ce passage à l'échelle, nous avons adopté une approche compositionnelle et exploité la synergie entre les techniques de synthèse de

contrôleurs discrets et de vérification formelle qui au-delà participe à la démonstration du respect des niveaux SIL exigés.

Dans le cas d'engagement simultané de ressources, les automates Max+ ont été étendus pour appréhender la synthèse synchrone.

3. Actionneur

L'apport majeur se situe sur la mise au point d'outils qui exploitent des grandeurs caractéristiques des défauts et de méthodes pour la supervision de ceux-ci.

Verrous scientifiques

Les verrous scientifiques concernent la mise en place de nouvelles méthodes tant pour la supervision que pour l'estimation de fin de vie restante sachant que les comportements et le fonctionnement changent avec le vieillissement. Le champ d'application va du convertisseur électromécanique à son alimentation et aux dispositifs de stockage de l'énergie.

Propositions

Ainsi, des méthodes heuristiques basées sur le comportement des essaims de particules, des fourmis artificielles voire l'algorithme hybride du Kangourou, ont été mises en œuvre pour effectuer soit l'apprentissage, soit pour la poursuite des signatures de défauts.

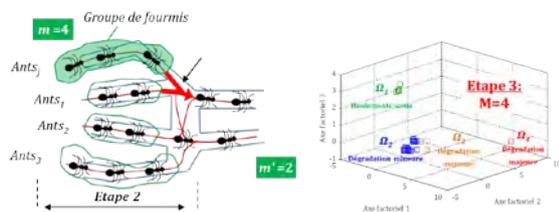


Fig.3. Classification par algorithme des fourmis artificielles et pronostic

Nous avons aussi travaillé sur la classification à base de chaîne de Markov cachées. A chaque mode de fonctionnement est associé un modèle. L'affectation d'un élément à une classe est liée au modèle le plus probable. Par ailleurs, nous avons développé les premiers algorithmes de pronostic, appliqué au vieillissement des roulements. En effet, le pronostic peut être défini comme une extension du problème de diagnostic. La prédiction d'un défaut est réalisée par trois méthodes basées sur les modèles de Markov cachés pour la détection de l'imminence d'un défaut ainsi que deux méthodes basées le système neuro-flou (ANFIS pour Adaptive Neuro Fuzzy Inference System et le neurone neo-flou) pour estimer le temps restant avant son apparition.

D. Positionnement, collaborations et partenariats

Les travaux relevant de l'assistance à la décision pour la supervision de process et de conception sûre pour les systèmes embarqués contribuent à l'extension de techniques basées sur les SED. Nos

propositions exploitent les formalismes de vérification formelle et de synthèse de contrôleurs bien identifiés au sein de la communauté IFAC, MSR, WODES et de DCDS. Toutefois, rares sont les validations sur objets industriels. Les travaux relevant du diagnostic et du pronostic contribuent à l'extension des approches dites de softcomputing.

Nos collaborations académiques : CRAN, LAGIS, IFSTTAR dans le cadre d'un FUI porté par Bombardier, le LAAS sur un projet international de coopération liant diagnostic et supervision (PCP Venezuela). Plusieurs thèses en cotutelles (Tunisie, Venezuela) et collaboration en cours le East Lansing (Michigan).

Parmi nos partenaires industrielles : PDVSA (Vz), Bombardier, Dassault Système, Thalès.

E. Faits marquants

- ✓ Nos publications ont donné lieu aux prix des meilleurs articles :
 - Détection des défauts dans les moteurs asynchrones par une nouvelle méthode basée sur les fourmis artificielles, JCGE 2011
 - Méthode de conception sûre de systèmes embarqués à base de COTS, CIEL 2012 ([hal-00811615](#))
- ✓ Collaboration avec le Green sur le diagnostic d'un actionneur électrique de commande de vol
- ✓ Intégration en 2013 dans le programme de l'IEED SuperGRID sur les architectures HVDC fiables et reconfigurables.

F. Références

- [1] G. Faraut, L. Piétrac, E. Niel, "Process tracking by equivalent states in modal supervisory control", Proc. of the [IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation](#), France, 2011
- [2] M. Ren, E. Dumitrescu, L. Piétrac, E. Niel, "Incremental discrete controller synthesis for communicating systems based on modular decomposition", WODES 2012
- [3] S. Hajjar : "Méthode de conception sûre de systèmes embarqués à base de COTS ", [Thèse](#) de doctorat (direction E. Niel et E. Dumitrescu). INSA de Lyon, 2013
- [4] A. Soualhi, H. Razik, G. Clerc, "Prognosis of Bearing Failures using Hidden Markov Models and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", [IEEE Transactions on IES](#), vol. 61 n°6, pp. 2864 – 2874, 2014
- [5] A. Soualhi, G. Clerc, H. Razik, "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor using an Improved Ant Clustering Technique". [IEEE Transactions on IES](#), vol. 60 n°9, pp. 4053 – 4062, 2013

Fiche MIS 4 : Identification, Observation & Capteurs Logiciels

L. Bako, E. Blanco, X. Brun, J. Huillery, X. Lin Shi, M.T. Pham, G. Scorletti, M. Smaoui, D. Thomasset, H. Yahoui

A. Résumé

Cette activité vise un double objectif :

(i) Développer des méthodes générales d'identification de modèles et d'observation (estimation paramétrique) en prenant explicitement en compte l'incertitude et/ou le caractère temps variant / non linéaire / commuté des systèmes ainsi que la finalité des modèles et observateurs obtenus (identification/observation pour la commande) ;

(ii) Développer des méthodes adaptées d'estimation et d'observation pour les applications phares du laboratoire Ampère et les valider expérimentalement : diagnostic et commande de systèmes électriques, commande des systèmes électropneumatiques, robotique, etc.

Mots clés : identification, observation, dérivateurs, déconvolution, capteurs logiciels

B. Introduction/contexte

Cette activité se développe d'une part en interaction avec les développements théoriques sur l'analyse de la performance, la prise en compte des incertitudes et des effets temps variant, non linéaires et commutés (fiches [MIS 1](#) et [MIS 2](#)). Les problèmes d'observation et de déconvolution peuvent être interprétés comme des problèmes de conception de systèmes en boucle ouverte.

D'autre part, cette activité est portée par les applications développées dans les fiches [MIS 5](#), [MIS 6](#), [INTER 1](#) et [INTER 2](#). Du fait que de nombreux problèmes sont (et probablement resteront ouverts dans leur généralité), il est nécessaire d'exploiter les spécificités des applications visées et les potentialités des méthodes générales les plus avancées tout en contribuant à leur développement.

C. Description activité

1. Développement de méthodes générales

Les travaux développés s'articulent autour de l'identification et de la synthèse d'observateurs.

Identification pour la commande et la déconvolution

Les travaux sur la performance robuste (fiche [MIS 2](#)) portent sur la quantification du niveau de performance garanti en fonction du niveau d'incertitude du modèle. Sachant que l'expérience d'identification conditionne l'incertitude du modèle identifié et que la performance atteignable garantie par un correcteur dépend des incertitudes de modèles, l'idée est de construire l'expérience d'identification à réaliser en fonction du cahier des charges du correcteur. L'originalité des [travaux développés](#) est d'obtenir une expérience d'identification avec un coût (énergétique) minimal grâce à

une synergie entre l'approche d'identification et de commande robuste. Ces concepts ont été appliqués à l'identification pour la déconvolution [[hal-00655789](#)]. Parallèlement aux travaux de la fiche [MIS 2](#), la perspective est l'extension de l'approche à l'identification de systèmes avec des effets temps variant, non linéaire et/ou commutés.

Observation robuste et synthèse de systèmes en boucle ouverte

Des méthodes de conception d'observateurs efficaces ont été développées pour les systèmes linéaires stationnaires supposés parfaitement modélisés. Une telle hypothèse étant irréaliste, l'objectif est de développer des méthodes prenant en compte explicitement des écarts (robustesse) entre le modèle et le système observé. La très grande majorité des travaux présentés dans la littérature se sont focalisés sur la synthèse de filtres robustes, en utilisant des approches de type Lyapunov pour des classes spécifiques d'incertitudes. Par des approches entrée/sortie faisant appel aux IQC (fiche [MIS 2](#)), l'originalité des travaux développés est de proposer un ensemble complet de nouvelles méthodes de synthèse de filtres et d'observateurs, pour des structures d'incertitudes très générales, basées sur l'optimisation convexe sous contrainte LMI [thèse [Bayon](#), ref. [2]].

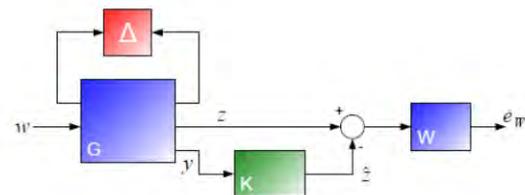


Fig.1. Synthèse de filtres robustes

De façon plus fondamentale, ils ont mis en évidence la possibilité de formuler de façon convexe des conditions peu pessimistes pour les problèmes de synthèse robuste en boucle ouverte [[hal-00793954](#), [hal-00734571](#)]. Des premières applications ont été réalisées en déconvolution robuste et testées expérimentalement [[hal-00772618](#), [hal-00655805](#)]. Malgré le fort potentiel des IQC pour l'observation, peu de travaux ont été développés avec ce degré de généralité. Leur utilisation ouvre la prise en compte d'effets non linéaires et temps variant, la formalisation de la performance étant fondée sur la norme incrémentale [[hal-00651984](#)], (fiche [MIS 2](#)).

2. Développement de méthodes adaptées

Le développement de capteurs logiciels a été étudié sur les applications phares du Laboratoire Ampère à travers trois problématiques : la dérivation en présence de bruit, les pertes d'observabilité ainsi que le caractère commuté/temps variant.

Dérivation et application aux capteurs logiciels pour les systèmes fluide sous pression

Les commandes en position des systèmes mécaniques nécessitent souvent, en plus des capteurs de

position, des capteurs de vitesse et d'accélération. Ces deux derniers types de capteurs sont remplacés par des algorithmes de dérivation (dérivation numérique) qui calculent des estimations de la vitesse et de l'accélération à partir de mesures de position (capteur logiciel). Bien que la dérivation numérique soit un problème classique en automatique, cela ne s'est pas traduit par le développement de capteurs logiciels adaptés, notamment pour la commande de systèmes électropneumatiques et électrohydrauliques. Les travaux ont porté sur la dérivation algébrique, par observateurs par modes glissants d'ordre supérieur ou par observateurs H infini pondérés ainsi que sur leur intégration en temps réel. Les algorithmes ont été testés et comparés en co-simulation et expérimentalement sur des systèmes fluide sous pression [thèses Sidhom et Dridi, [hal-00550422](#), [hal-00550424](#) et, pour d'autres applications : [hal-00799772](#), [2]]. Le bruit est pris en compte suivant deux axes : en présence de son modèle, dérivateur optimal (H infini) [[hal-00799203](#)], en l'absence, dérivateur par modes glissants d'ordre un adaptatif [5], observateur non linéaire dont nous avons prouvé la convergence en temps fini (Lyapunov). A la différence des travaux du projet [INRIA-Non-A](#), les algorithmes adaptatifs proposés ne présentent pas de contrainte d'initialisation.

Capteurs logiciels pour les systèmes présentant des pertes d'observabilité

Pour des raisons économiques, des capteurs logiciels doivent se substituer aux capteurs physiques. Deux classes d'application ont été étudiées : commandes de position des moteurs synchrones à aimant permanent et des vérins électropneumatiques. La difficulté est ici la perte d'observabilité avec l'annulation de la vitesse. La solution développée est d'injecter sur les commandes des signaux hautes fréquences : couplée à un filtre de Kalman étendu, la solution a été validée sur bancs expérimentaux [thèses Zgorski et Abry, [hal-00704657](#), [hal-00704651](#)] et testée avec un observateur LPV [[hal-00793950](#)] et par mode glissant [[hal-00799772](#)]. Elle fait l'objet du brevet [1].

Observateurs pour les systèmes commutés

Deux approches ont été utilisées pour développer des observateurs des systèmes commutés à partir d'un modèle moyen et d'un modèle commuté. Dans le premier cas, la démonstration de convergence de l'observateur basé sur des modèles moyens de convertisseurs de puissance se base sur le formalisme hamiltonien [[hal-00799336](#), [4]]. L'observateur commuté proposé permet la prise en compte de modes de fonctionnement inobservables, ce qui est un cas peu traité dans la littérature [thèse Meghnous, [hal-00799362](#)].

D. Collaborations et Partenariats

Par rapport à d'autres équipes, une originalité est d'intégrer toutes les étapes, des développements théoriques basés sur des démonstrations de propriétés à la mise en œuvre expérimentale. Une

autre originalité est de développer des travaux à l'interface de deux domaines de l'automatique et reconnus par ceux-ci. L'activité est basée sur une collaboration avec le département DCSC de l'Université de Delft (identification et déconvolution robuste), l'équipe EMMAH de l'INRA (filtrage robuste) et le LAGEP (observation non linéaire appliquée au diagnostic).

E. Faits marquants

- ✓ Des méthodes de conception d'observateurs / filtres prenant en compte explicitement les incertitudes par optimisation convexe, avec un faible niveau de pessimisme ont été obtenus dans la thèse de B. Bayon, ce qui n'est pas en général possible pour les problèmes de conception robuste.
- ✓ Les travaux sur les méthodes d'injection de signaux pour l'observation ont fait l'objet d'un brevet.
- ✓ Les différentes techniques appliquées ont fait l'objet de réalisations logicielles et de démonstrateurs temps réels.

F. Références

- [1] Brevet [WO 2012143458](#) - F. Abry, X. Lin-Shi and A. Zgorski, "Method of detecting an angular position of a synchronous machine rotor"
- [2] B. Bayon, G. Scorletti and E. Blanco, "Robust L2-Gain Observation for structured uncertainties: an LMI approach", 50th IEEE CDC-ECC, 2011
- [3] X. Bombois and G. Scorletti, "Design of least costly identification experiments," JESA 46, 6-7, pp. 587-610, 2012
- [4] A.-R. Meghnous, M.T. Pham, X. Lin-Shi. "Nonlinear Observer and Lyapunov-Based Control for SEPIC Converter: Design and Experimental Results," Proc. of ACC (2013).
- [5] L. Sidhom, M. Smaoui, D. Thomasset, X. Brun, E. Bideaux, "Adaptive Higher Order Sliding Modes for Two-dimensional Derivative Estimation," 18th IFAC World Congress, 2011.

X. Brun, E. Bideaux, M. Di Loreto, A. Hijazi, J. Joly, X. Lin Shi, P. Massioni, S. Sesmat, M. Smaoui, D. Thomasset

A. Résumé

Nous présentons ici les développements effectués en Automatique non linéaire en termes de commande et de gestion d'énergie pour des applications complexes utilisant différentes sources d'énergies : pneumatique (air, hélium, gaz médical), hydraulique (huile, fluide frigorigène), électrique (batterie, supercondensateur). Ces travaux sont à caractères méthodologiques et appliqués.

Mots clés : Commande Non Linéaire : Platitude, Backstepping, Modes glissants, Gestion d'énergie, Fluid Power, Transport

B. Introduction/contexte

Les travaux effectués dans le domaine de l'Automatique reposent sur une démarche de modélisation fine des systèmes complexes étudiés, demandant des connaissances pluridisciplinaires en thermodynamique, mécanique, électronique, électrotechnique afin d'établir des modèles de simulation. Ces modèles sont alors simplifiés dans un but d'analyse et de synthèse de commande et d'observateurs. Dans ce contexte, les commandes étudiées lors de ce quadriennal sont essentiellement des stratégies de commande non linéaire du fait du comportement fortement non linéaire des systèmes étudiés. L'originalité de ces travaux repose sur le fait que toute la démarche de l'automaticien est étudiée en terme de conception, dimensionnement, analyse, synthèse de commande pour partir du cahier des charges jusqu'à la réalisation temps réel de la commande sur un processus industriel ou un prototype conçu en collaboration institutionnelle ou industrielle. Les bancs utilisés et/ou développés lors de ce quadriennal ont fortement participé au développement du Centre d'Essais Fluid Power.

C. Description activité

1. Commandes linéarisantes

Les deux techniques étudiées sur des systèmes non linéaires complexes concernent la linéarisation entrées / sorties par feedback et la platitude. Ces deux techniques ont pour avantage principal de linéariser le système sur une grande plage de fonctionnement ce qui permet d'avoir des commandes globales et non locales. Par contre, leur défaut principal concerne leur robustesse : si le modèle n'est pas suffisamment connu, cette approche peut s'avérer dangereuse en terme de stabilité.

Dans le cadre de la linéarisation par bouclage endogène statique, la difficulté réside non pas dans la synthèse de la commande mais dans la recherche de preuve de la stabilité de la dynamique résiduelle. Dans ce cadre, des difféomorphismes adéquats

permettent de simplifier l'étude de stabilité globale qui est un réel problème (par exemple pour les systèmes à fluide sous pression). Des résultats locaux ont été ainsi obtenus. Ils sont encore insuffisants pour une belle preuve théorique mais très utiles pour leur application, le bassin d'attraction étant tout le domaine de travail. De plus, des techniques de commande commutant sur deux objectifs ont permis de résoudre des problèmes de stabilité asymptotique connus sous le terme de redécollage (cas particulier de « stick-slip »). Ces preuves de stabilité ont été obtenues en utilisant l'optimisation convexe pour des modèles simplifiés linéaires par morceaux.

L'approche de platitude a été utilisée dans le cadre de la synthèse de commande non linéaire par feedforward. L'avantage ici est de linéariser globalement le modèle étudié, la complexité se situant dans la recherche de sorties plates et la gestion des singularités des commandes. Notre originalité réside dans le fait de chercher ces sorties plates dès les phases de conception du système physique. L'automaticien intervient alors sur l'architecture physique du système afin de pouvoir agir sur les transferts énergétiques de l'ensemble. Des travaux utilisant l'outil bond graph ont permis de spécifier des architectures dites plates dont les modèles possèdent des propriétés fortes de stabilité (stabilité asymptotique exponentielle globale). Cette approche initialisée sur des actionneurs électropneumatiques a été étendue à des actionneurs hydrauliques et à des systèmes de transport.

2. Commandes stabilisantes

Une autre approche connue en automatique pour la commande des systèmes non linéaires concerne la commande par stabilisation qui cherche avant tout à stabiliser le système, sans pour autant maîtriser ses performances. Dans ce cadre nous nous sommes intéressés aux techniques des modes glissants et du backstepping.

Les travaux sur les modes glissants au sein du laboratoire ont commencé il y a une vingtaine d'années et ont permis de résoudre le problème de réticence (« chattering ») en utilisant des algorithmes d'ordre supérieur. Lors de ce quadriennal, la principale avancée effectuée au laboratoire Ampère sur les modes glissants concerne l'utilisation de l'algorithme du super twisting, initialement développé pour la commande, comme un algorithme de différentiation robuste. Ceci a permis dans les applications en temps réel de s'affranchir de capteurs pour reconstruire les dérivées première et seconde de n'importe quel signal sur une grande plage de fréquence et d'amplitude (fiche [MIS 4](#)). Ces résultats sont depuis deux ans utilisés dans de nombreux algorithmes de commande nécessitant des dérivées de signaux et ont permis l'amélioration des performances de nombreux procédés.

L'utilisation de la technique du backstepping débute par la recherche de modèles sous forme « strict feedback ». Lorsqu'un changement de variable permet de le faire alors la synthèse par fonctions de Lyapunov successives entraîne des résultats très intéressants en termes de stabilité. Néanmoins comme pour la plupart des techniques de commande non

linéaires, la difficulté réside dans l'apparition de nombreux paramètres de réglage sans information concernant leur influence sur les performances du système. Ce problème, bien connu des automatismes et trop peu souligné a été particulièrement étudié ces derniers temps au sein du laboratoire. Dans le cadre des actionneurs fluidiques un changement de variable adéquat a permis de montrer qu'il est possible de donner un sens physique aux paramètres de synthèse de commande par back-stepping. Ainsi, pour la première fois à notre connaissance, il a été possible d'effectuer en temps réel un suivi de position et un suivi de raideur en boucle fermée afin de pouvoir dynamiquement et statiquement maîtriser une perturbation d'effort sur un axe en mouvement et donc ainsi sa compliance.

3. Gestion d'énergie

Les problèmes de gestion d'énergie ont été principalement étudiés en terme de planification de trajectoire et gestion de mode et ce au niveau actionneur, système et système dans son environnement.

Au niveau actionneur, des travaux issus des commandes non linéaires ont permis de développer des actionneurs pneumatiques alliant performances de suivi de trajectoire de position ou de force et faible consommation énergétique.

Au niveau système, à l'aide d'une approche d'optimisation, des algorithmes ont été développés, permettant ainsi de répartir la puissance dans un système multi-sources d'énergie (exemple batterie et pile à combustible). Les apports dans ce domaine concernent la synthèse d'algorithmes de gestion d'énergie pour des applications temps réel avec l'adoption d'une méthode d'optimisation globale combinée à une stratégie de commande prédictive et l'inclusion de la dynamique du système.

Nous avons également travaillé à plus haut niveau de synthèse sur l'optimisation énergétique de l'utilisation des véhicules conventionnels, électriques et hybrides. L'application des algorithmes d'optimisation au principe d'éco-conduite a permis de quantifier l'apport de l'éco-conduite et ses avantages économiques et écologiques.

D. Collaborations et Partenariats

Nos fortes compétences en termes de commande et de gestion d'énergie des systèmes multi-physiques se sont développées dans ce quadriennal via de nombreuses collaborations institutionnelles et industrielles classées ci-dessous en trois thématiques pour lesquelles Ampère est reconnu :

1. Fluid Power

- ✓ Commande de banc hydraulique pour tests hautes performances [Thèse [Xu](#)].
- ✓ Commande et stabilisation d'actionneur électropneumatique [Thèses [Turki](#) et [Ameur](#)].
- ✓ Commande de machine frigorifique à pistons ou à vis [Thèse [Fallahsohi](#)].
- ✓ Plateforme de Stewart actionnée par muscles pneumatiques [Projet PEPS CNRS].
- ✓ Contrôle d'actionneur électropneumatique pour la commande du vecteur de poussée d'un nano lanceur [Thèse [Abry](#), projet CNES].

2. Robotique

- ✓ Conception et Commande d'un simulateur d'accouchement BIRTHSIM [Thèse Herzig, projet ANR [SAGA](#)].
- ✓ Automatisation d'un système multi-robot pick and place [Thèse Humbert avec Schneider El.]
- ✓ Commande d'attitude de picosatellite [LST].
- ✓ Développement de stimulateur pneumatique pour réaliser des potentiels évoqués chez l'homme [Projet CHU St-Etienne].

3. Transports

- ✓ Banc hacheur survolteur pour l'alimentation d'un trolleybus [Thèse [Hijazi](#)].
- ✓ Banc pneumatique de récupération d'énergie au freinage. [Projet CAP]
- ✓ Contrôle du patinage d'un véhicule mono et multi-sources de puissance [Thèse [Chapuis](#)]



- ✓ Optimisation de la trajectoire de vitesse pour les véhicules thermiques et électriques [Thèse [Mensing](#) IFSTTAR LTE, projet ADEME]
- ✓ Commande par platitude du système PROSPAC (Pile à combustible + Batterie), [Thèse [Da Fonseca](#), CEA LITTEN]
- ✓ Banc hybride d'actionneur électrique et hydraulique. [Thèse Gendrin, projet FUI Volvo]

E. Faits marquants

- ✓ Ampère est à ce jour le seul laboratoire français membre du réseau européen [FPCE](#)
- ✓ Plateforme de 180 m² unique en France
- ✓ 3 Brevets durant le quadriennal.

F. Références

- [1] F. Mensing, E. Bideaux, R. Trigui, H. Tattegrain: "Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints". *Transportation Research Part D*, 2013, 18, pp. 55-61
- [2] L. Sidhom, M. Smaoui, D. Thomasset, X. Brun, E. Bideaux: "Adaptive Higher Order Sliding Modes for Two-Dimensional Derivative Estimation". *Proc. of the 18th IFAC World Congr.*, 18, pp. 3063-3071
- [3] F. Abry X. Brun, S. Sesmat, E. Bideaux, "Non-linear position control of a pneumatic actuator with closed-loop stiffness and damping tuning", *ECC'13*, Zürich, 2013
- [4] R. Naiff Da Fonseca, E. Bideaux, B. Jeanneret, M. Gérard, M. Desbois-Renaudin, A. Sari: "Energy management strategy for hybrid fuel cell vehicle". *ICCSAS*, Oct 2012, Jeju, Korea, pp. 485 – 490
- [5] A. Hijazi, X. Lin-Shi, A. Zgorski, L. Sidhom: "Adaptive sliding mode observer-differentiator for position and speed estimation of Permanent Magnet Synchronous Motor". *SLED 2012*, Milwaukee

Fiche MIS 6 : Amélioration de la Sûreté de Fonctionnement des Systèmes de Stockage de l'Énergie

G. Clerc, A. Hijazi, H. Razik, A. Sari, P. Venet

A. Résumé

La réduction des ressources fossiles et minières, confortée par une prise de conscience environnementale portent les problématiques liées à l'énergie et à son stockage au cœur des préoccupations.

Des avancées technologies majeures sont attendues dans les années à venir dans le domaine des systèmes de stockage de l'énergie électrique et en particulier sur l'amélioration de leur sûreté de fonctionnement. Les systèmes de stockage couramment utilisés (batteries, supercondensateurs et condensateurs) présentent en effet des durées de vie limitées et peuvent engendrer des risques en matière de sécurité des biens et des personnes.

Les études des comportements électrothermiques sur les mécanismes de vieillissement de ces composants permettent de développer des modèles de grandes précisions, pour estimer leur état de santé et prévoir leur durée de vie.

Mots clés : Batterie, condensateur, supercondensateur, caractérisation, modélisation, durée de vie, vieillissement, diagnostic, pronostic

B. Introduction/contexte

Dans son rapport de mai 2013 sur les ruptures technologiques et les avancés qui transformeront la vie, les activités et l'économie mondiale d'ici 2025, le [McKinsey Global Institute](#) cite parmi les 12 avancées technologies majeures, les Systèmes de Stockage de l'Énergie (SSE). Leur marché potentiel jusqu'en 2025 pourrait atteindre 635 milliards de dollars par an dont plus de la moitié serait liée aux véhicules.

Si les principales avancées seront liées à l'emploi de nouveaux matériaux d'électrodes, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des SSE permettra de réduire leur coût d'exploitation et d'accroître leur développement. Des recherches sur les batteries, les supercondensateurs et les condensateurs sont menées au laboratoire AMPERE depuis plusieurs années dans ce sens.

C. Description activité

1. Caractérisation et modélisation

Un suivi du vieillissement nécessite de caractériser finement les SSE afin d'extraire des signatures de leur état de santé. Cet objectif de caractérisation optimale dans le temps le plus faible possible, a été abordé dans le cadre de la thèse CIFRE d'An LI en partenariat avec Renault [brevet [FR 2993993](#)].

Les travaux des doctorants [R. German](#) (thèse 2013, ANR [SUPERCAL](#)) et [M. Makdessi](#) ([ISS Power & Control](#)) ont permis grâce à des caractérisations temporelles et/ou fréquentielles d'identifier des modèles comportementaux permettant d'analyser le vieillissement des composants. Par exemple, le modèle multipore développé avec l'IFSTTAR

permet un suivi précis de l'état de vieillissement des pores des électrodes des supercondensateurs [1] ; les modèles de condensateurs films [2] permettent d'obtenir une adéquation particulièrement précise avec le comportement du composant sur une large plage de fréquence (Fig. 1).

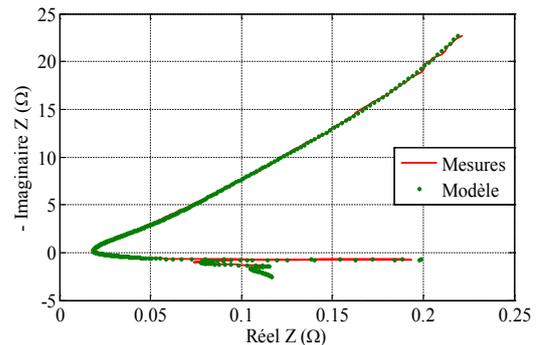


Fig. 1. Comparaison des impédances obtenues par mesure et par modélisation sur un diagramme de Nyquist pour un condensateur MPETF 680 nF-630 V.

2. Étude des contraintes

Plusieurs travaux ont été menés afin d'identifier précisément les contraintes électriques et thermiques influençant le vieillissement des composants. Nous avons analysé les profils de mission réels demandés à des batteries de véhicules ([thèse Devie](#), 2012). Notre outil a permis d'extraire les signatures typiques de cas aussi variés que des vélos à assistance électrique, des véhicules hybrides et électriques et d'un trolleybus. Pour chaque cas les sollicitations caractéristiques ont été déterminées. Des profils synthétiques représentatifs de l'application ont pu être proposés, qui ont permis d'établir des profils de vieillissement accéléré caractéristiques de l'utilisation des véhicules.

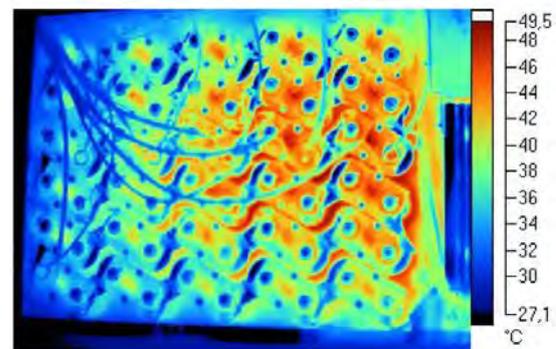


Fig. 2. Photo thermique du banc de supercondensateurs 50 kW pour récupération d'énergie de freinage d'un trolleybus

Le développement des SSE sous forme de modules (assemblage d'éléments) se heurte à des difficultés liées à la dissipation thermique des composants. Dans le cadre du projet Hybus ([4] et [thèse Hijazi](#)) le modèle thermoélectrique d'un banc de supercondensateurs a permis de prédire les évolutions de la température de chaque composant en fonctionnement. La comparaison entre les températures obtenues par simulation et par mesures (Fig. 2) a montré une très bonne concordance. Le vieillissement des composants a pu être intégré au modèle proposé.

Pour identifier l'impact négatif ou éventuellement positif de sollicitations sur les batteries, [F. Savoye](#) (thèse CIFRE Volvo) a identifié le rôle potentiel des impulsions périodiques de courant sur la performance et la durée de vie d'accumulateurs

lithium ion [5]. Par ailleurs, en se référant à une application de véhicule industriel hybride électrique, nous avons évalué sur des critères techniques et économiques l'intérêt d'implémenter un système de stockage d'énergie combiné, c'est-à-dire mutualisant l'usage d'une batterie Li-ion et de supercondensateurs / condensateurs.

3. Etude des mécanismes de vieillissement

Afin d'étudier les différents mécanismes de vieillissement des SSE, plusieurs types d'essais de vieillissement accéléré sont mis en œuvre (calendaire, cyclage, ondulations haute fréquence, impulsions...). Nos études permettent d'identifier les phénomènes physiques de vieillissement liés aux conditions d'utilisation des composants. A titre d'exemple, nous donnons ici quelques résultats originaux marquants : pour les supercondensateurs, le non-impact sur le vieillissement des ondulations de courant ; l'augmentation inattendue de la cinétique de vieillissement lors de baisses périodiques du niveau de contrainte en tension (th. [R. German](#)).

4. Estimation de la durée de vie

Les thèses de [P. Kreczanik](#) (2012, projet Hybus), [R. German](#) et M. Makdessi (déjà citées) ont permis d'identifier les différents facteurs qui influent sur la durée de vie des supercondensateurs et de condensateurs film, et de proposer des nouvelles lois de vieillissement. Ces lois peuvent être par exemple de type Eyring (généralisation de la loi d'Arrhenius) en considérant des contraintes en température, tension et courant efficace.

Des lois de suivi de dégradation temporelles des paramètres électriques ont aussi été élaborées. Notamment, une loi en racine carrée du temps, qui lie la perte de capacité d'un supercondensateur à la croissance d'une couche d'interface électrode/électrolyte, a été proposée ([R. German](#)).

5. Pronostic de l'état de santé

La connaissance des mécanismes de vieillissement et des lois de suivi des paramètres électriques, inhérentes à ces mécanismes, nous a permis de proposer plusieurs méthodes de pronostic de l'état de santé des SSE.

Les travaux effectués par le doctorant Ali Zenatti (en collaboration avec SAFT et le GREEN) ont permis d'estimer l'état de charge ainsi que l'état de santé des batteries lithium ion en combinant des méthodologies basées sur la logique floue avec des mesures d'impédance [brevet [EP2410346](#)].

Pour diagnostiquer l'état de santé des deux composants à risque des alimentations sans interruptions, à savoir les condensateurs électrolytiques et les batterie plomb étanches, K. Abdennadher (thèse CIFRE APC by Schneider Electric) a développé des observateurs à base de filtre de Kalman qui pourront être intégrés sur les microprocesseurs des futures alimentations sans interruptions moyennant quelques lignes de codes supplémentaires [6].

De son côté, [A. Soualhi](#) a étudié durant son doctorat des méthodes sans modèle, basées sur les données

de mesure, pour pronostiquer l'état de santé des SSE. L'hypothèse faite est que les paramètres de surveillance extraits des données de mesure recueillies sur le système restent relativement inchangée jusqu'à l'apparition d'un défaut. Ces paramètres de surveillance sont des mesures *passives* (tension, courant, température), ou *actives* (spectres d'impédance). Ils permettent de diagnostiquer l'état de santé des SSE et, par estimation de leurs tendances, de pronostiquer leur « RUL » (Remaining Useful Life). Ces méthodes ont déjà été appliquées avec succès aux pronostics de l'état de santé des condensateurs films et des supercondensateurs [7].

D. Positionnement

Collaborations industrielles :

Airbus, APC by Schneider Electric, Blue Solutions, Irisbus, PSA Peugeot Citroën, Renault, Saft, Valeo, Volvo

Partenaires académiques :

IFSTTAR, IMS, GREEN.

E. Faits marquants

- ✓ Une expérimentation en grandeur nature sur une ligne de trolleybus d'un système de stockage par supercondensateurs 50 kW, 1 MJ récupérant l'énergie de freinage du véhicule a été réalisée (voir fiche spécifique « Fait marquant : A11.6 Electromobilité »).
- ✓ Les travaux sur les SSE ont permis d'entreprendre un partenariat rapproché avec le LTE de l'IFSTTAR qui s'est concrétisé par la création d'une [Equipe de Recherche Commune](#) « GEST » (Gestion Energie et Stockage pour les Transports) entre Ampère et LTE (IFSTTAR).

F. Références

- [1] R. German, P. Venet, A. Sari, et al. : "Improved Supercapacitor Floating Ageing Interpretation Through Multi-pore Impedance Model Parameters Evolution", [IEEE Tr. on Power El. 29/7](#) (2014).
- [2] M. Makdessi, A. Sari, P. Venet "Improved Model of Metallized Film Capacitors", [IEEE Tr. on Dielect. and Electrical Ins., accepted](#) (2014).
- [3] A. Devie, E. Vinot, S. Pelissier, P. Venet: "Real-World Battery Duty Profile of a Neighbourhood Electric Vehicle". [Transp. Res. C, Vol. 25](#) (2012).
- [4] A. Hijazi, P. Kreczanik, E. Bideaux, et al. : "Thermal network model of supercapacitors stack". [IEEE Tr. on Ind. El. 59/2](#) (2012).
- [5] F. Savoye, P. Venet, M. Millet, J. Groot : "Impact of periodic current pulses on Li-ion battery performance". [IEEE Tr. on Ind. El. 59/9](#) (2012).
- [6] K. Abdennadher, P. Venet et al.: "A real time predictive-maintenance system of aluminium electrolytic capacitors used in uninterrupted power supplies". [IEEE Tr. on Ind. Appl. 46/4](#) (2010).
- [7] A. Soualhi, R. German, A. Sari et al.: "Supercapacitors Ageing Prediction by Neural Networks". [IEEE IECON 2013](#).

X. Brun, A. Leleve, R. Moreau, M.T. Pham, T. Redarce

A. Résumé

La robotique médicale au laboratoire AMPERE s'intéresse principalement aux gestes médicaux via en développant depuis plus de 10 ans des simulateurs pour l'apprentissage et des méthodes d'analyse des gestes en vue de leur évaluation objective.

Mots clés : Apprentissage et évaluation de gestes médicaux, Conception et Commande de robot médicaux, Haptique, Électropneumatique, Modélisation.

B. Introduction/contexte

Historiquement, l'activité robotique du laboratoire concernait la robotique industrielle. Depuis le début des années 2000, notre activité s'est plutôt orientée vers la robotique médicale avec des travaux sur le développement d'outils et de méthodes dédiés à l'apprentissage et l'évaluation des gestes chirurgicaux.

Traditionnellement, le geste médical est un geste appris empiriquement, ce qui rend difficile le transfert du savoir-faire entre les médecins. L'objectif est de remédier aux faiblesses de l'enseignement clinique et pratique en médecine et de combler le fossé entre la théorie et la pratique. De ce constat, il nous est apparu nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'apprentissage et d'assistance du geste médical. Nous nous intéressons donc à ces deux aspects, d'une part à travers le développement et la commande des simulateurs dédiés à l'apprentissage des gestes médicaux et, d'autre part, à la mise en œuvre de systèmes d'assistance au geste afin de soulager le médecin de tâches pénibles. Ce travail repose sur des aspects de conception et de modélisation de systèmes mécatroniques, de commande de systèmes, et d'asservissement visuel. Dans la continuité des activités menées au laboratoire sur le dimensionnement de systèmes mécatroniques et l'analyse structurelle de systèmes multi-physiques et multi échelles des domaines d'application telle que la robotique de chantier sont développés au sein du laboratoire.

C. Description activité

1. Méthode d'évaluation des gestes

Une des problématiques liées au développement d'outils pour la formation des gestes chirurgicaux est la difficulté d'évaluer l'apport de la simulation pour l'apprentissage. Il est donc nécessaire de développer des techniques permettant de comparer des gestes entre eux. Une première méthodologie a été développée puis mise en place au sein du laboratoire. Elle repose sur la longueur d'arc et la courbure des trajectoires. L'algorithme développé, appelé DALW (Dynamic Arc Length Warping),

permet de comparer des trajectoires 3D indépendamment de la nature des capteurs utilisés [Thèse de Cifuentes].

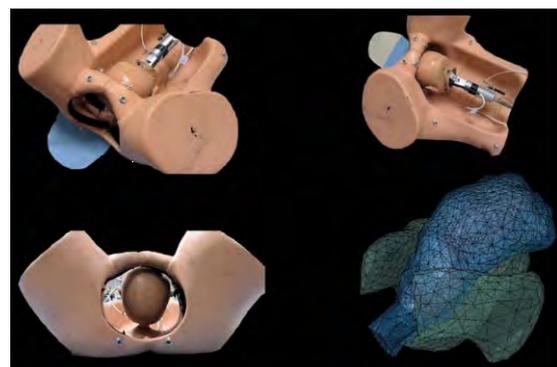
2. Apprentissage du geste

L'apprentissage du geste doit prendre en compte le phénomène appelé "self advantage". En effet nous avons démontré que l'Homme arrive à distinguer ses propres gestes de ceux d'une autre personne [Thèse [Moubarak](#), projet Européen WARTHE]. Or la transmission du savoir-faire en chirurgie nécessite une transmission du savoir-faire entre deux personnes distinctes. Il faut donc prendre en compte ce phénomène pendant l'apprentissage du geste.

Pour améliorer la courbe d'apprentissage, il est nécessaire de comprendre et reproduire au mieux le geste de l'humain. Ainsi des simulateurs sont développés au laboratoire. En particulier un simulateur d'accouchement qui doit permettre de reproduire différents types d'accouchement afin de proposer des outils de formation aux sages-femmes et aux obstétriciens. Un modèle numérique a été développé [Thèses [Buttin](#)] et est actuellement en train d'être couplé à une interface haptique [Thèse de Herzig, projet ANR [SAGA](#)].

3. Haptique et téléopération

Une autre problématique sur laquelle nous travaillons est l'apprentissage à distance et en coopération. En effet il peut être intéressant pour des médecins d'accompagner l'apprentissage de novices sans avoir à être présent à leurs côtés. Ainsi nous avons développé une interface haptique constituée d'un maître et d'un esclave. Cette interface peut également être utilisée pour faire de la téléopération i.e. manipuler à distance un outil. Il sera ainsi possible de manipuler un actionneur à l'intérieur d'une IRM alors que le médecin est à l'extérieur de cette pièce [Thèse de [M.-O. Le](#), projet PEPS DecortiqueMax et API Haptique]. Une des originalités de ces travaux provient de la nature des actionneurs utilisés. En effet, la technologie pneumatique a été choisie pour profiter de leur compliance naturelle qui rend plus réaliste le rendu haptique. Différentes lois de commande ont été testées (modes glissants et commande hybride). Pour se former à ce type d'outil, l'apprenant pourra le co-manipuler avec un expert potentiellement situé à distance [Thèse de Liu].



Couplage entre simulations numérique et haptique d'un accouchement.

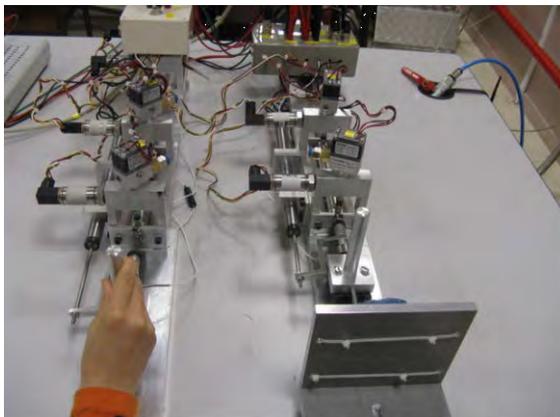
En collaboration avec l'institut PRISME, nous étudions une sonde haptique pneumatique pour proposer aux radiologues une sonde maîtresse restituant des efforts réalistes dans le cadre d'une télé échographie [projet SoHappy].

D. Partenariats

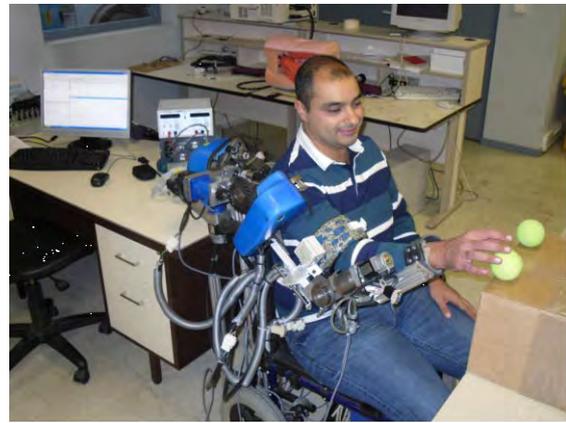
- ✓ Institutionnels : INSERM, CHU St-Etienne, HCL
- ✓ Internationaux : Canada (AMMI, MRC, Telerobotic and Biorobotic Group), Colombie (Universidad Nacional de Bogota), Italie (Department of Psychology), Rép. tchèque (CMP).
- ✓ Nationaux : LIRIS, FEMTO ST, LIRMM, LSIIT, Roberval, PRISME, LAMCOS
- ✓ Industriels : All4Tec, S&R, Mobilev, Mesea.
- ✓ GdR Stic Santé : codirection du thème F (Apprentissage et Assistance aux gestes médico-chirurgicaux)
- ✓ GdR Robotique : codirection du GT1 (Robotique Médicale).
- ✓ Prof. invités (Univ. of Alberta, Canada) :
 - Mahdi Tavakoli (Telerobotic and Biorobotic Group) : 3 mois en 2010
 - Irene Cheng (MRC) : 2 mois en 2011 - Anup Basu (MRC) : 1 mois en 2012

E. Faits marquants

- ✓ Utilisation d'un exosquelette au service de la neuroscience.
- ✓ Démonstration de la faisabilité d'une interface haptique à énergie pneumatique.
- ✓ Couplage entre une simulation numérique et une interface haptique pour l'apprentissage des gestes de l'accouchement.
- ✓ Partenariats avec des médecins (inscription en thèse scientifique de médecins au laboratoire AMPERE en cours).



Démonstration de la faisabilité de la commande bilatérale avec une interface haptique en vue de la téléopération.



Un exosquelette avec une application en neuroscience.

F. Références

- [1] MQ Le, MT Pham, M Tavakoli, R Moreau, JP Simon, T Redarce : "Bilateral Control of Nonlinear Pneumatic Teleoperation System with Solenoid Valves". [IEEE Trans. on CST](#), 21/4, pp. 1463 – 1470, 2013.
- [2] J Cifuentes-Quintero, R Moreau, F Prieto, MT Pham, T Redarce: "Why and how to objectively evaluate medical gestures?". [IRBM](#), 2013, 34 (1), pp. 74-78.
- [3] R Moreau, MT Pham, M Tavakoli, T Redarce. "Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master-slave pneumatic servo systems". [CEP](#), 2012
- [4] J Cifuentes, MT Pham, R Moreau, F Prieto, P Boulanger. "An Arc-length Warping Algorithm for Gesture Recognition Using Quaternion Representation". Proc. of the 35th Annual International Conference of the [IEEE Engineering in Medicine and Biology Society](#), Osaka, Japan, July 2013, pp. 6248-6251
- [5] R Moreau, S Moubarak, MT Pham, F Frassinetti, A Farne. "The use of an exoskeleton to investigate the self advantage phenomenon". Proc. of the 35th Annual International Conference of the [IEEE Engineering in Medicine and Biology Society](#) Osaka, Japan, 3 - 7 July 2013, pp. 2503-2506
- [6] S. Hodgson, M. Tavakoli, A. Lelevé 2, M.T. Pham, "Control of a teleoperation system actuated by low-cost pneumatic on/off valves", [Proc. of the IEEE IROS](#), pp. 3029 – 3034, 2012
- [7] R. Moreau, M.T. Pham, X. Brun, T. Redarce, O. Dupuis, "Simulation of an instrumental childbirth for the training of the forceps extraction: control algorithm and evaluation", [IEEE Tr. on Information Technology in Biomedicine](#) 15/3 (2011) pp 364 - 372

Inter-département MIS/EE

Fiche *inter* 1 : Compatibilité Électromagnétique des Convertisseurs d'Électronique de Puissance

A. Bréard, C. Joubert, L. Krähenbühl, C. Martin, F. Morel, C. Voltaire

A. Résumé

Cette activité permet d'établir un lien entre les développements méthodologiques (modèles pour la CEM, traitement des incertitudes) et leur mise en œuvre au sein de convertisseurs de puissance sûrs et efficaces, intégrant des composants SiC.

Mots clés : CEM, perturbations conduites, couplages, champs proches, environnement sévère, filtres, convertisseurs, SiC

B. Introduction/contexte

Le nombre croissant de dispositifs de conversion statique (électronique de puissance) dans les systèmes complexes (transport, industrie, tertiaire) et leur impact de plus en plus important sur l'électronique avoisinante et sur les réseaux électriques imposent des contraintes de plus en plus sévères en termes de fiabilité et sécurité. Les concepteurs sont aujourd'hui confrontés à deux préoccupations majeures : d'une part, ils doivent s'assurer du respect des normes limitant les émissions parasites et le respect de l'exposition des personnes aux champs EM à proximité, d'autre part, ils doivent garantir le bon fonctionnement de l'ensemble des équipements dans une ambiance électromagnétique normalement polluée. C'est pourquoi l'étude CEM d'un système doit aujourd'hui faire partie intégrante du cycle de développement, et doit intervenir dès le début de la phase de conception. Cet aspect est le principal point bloquant que l'ensemble des recherches en CEM au laboratoire Ampère visent à dépasser.

C. Description activité

1. Modélisation des chemins de propagation

Les travaux de modélisation des chemins de propagation ont porté d'une part sur les perturbations conduites et d'autre part sur les couplages en champs proches.

Modélisation des circuits passifs

Les méthodes de modélisation de composants passifs peuvent être classées en deux catégories : les méthodes extensives et les méthodes « boîtes noires ». Les utilisations sont différentes et complémentaires. Les travaux ont porté sur les deux démarches.

Dans le premier cas, les perturbations conduites dans un convertisseur d'électronique de puissance utilisant des JFET en carbure de silicium ont été modélisées en représentant chaque élément (charge, condensateurs, pistes...) par un circuit équivalent [1]. La comparaison avec les résultats expérimentaux a permis de montrer que les perturbations de mode commun et de mode différentiel au niveau du RSIL pouvaient être prédites jusqu'à 10 MHz avec une précision supérieure à 6 dB μ V, en dépit

des vitesses de commutations des composants en SiC (supérieures à celles constatées avec des composants en Si). Lorsque différents routages ou valeurs de résistances de grille ont été considérés, l'impact mesuré sur le spectre des perturbations a été prédit par le modèle. C'est un résultat important pour les concepteurs de convertisseurs.

Nous avons également poursuivi nos travaux sur la modélisation de portions de circuits passifs (filtres, charge...) par matrices d'impédances. Précédemment restreinte au mode commun, cette méthode essentiellement basée sur des mesures a été élargie à la prise en compte des modes différentiels et des transferts de mode [2]. Les temps de calculs très réduits permettent de tester rapidement l'association de portions de circuits dont les matrices d'impédances ont été préalablement mesurées. Ce modèle a été utilisé avec succès pour optimiser le choix des composants d'un filtre dans une bibliothèque fournie par les constructeurs.

Couplage par champs proches

Nos travaux visent maintenant le couplage de l'approche précédente aux calculs de perturbations rayonnées au voisinage des câbles d'alimentation des convertisseurs, et plus généralement entre éléments d'un circuit, ou entre systèmes non interconnectés.

L'objectif est ici d'établir des modèles permettant de prédire de manière précise, systématique mais rapide le couplage en champ proche entre systèmes ou sous-système (par exemple, éléments d'un convertisseur d'un filtre CEM). Pour ce faire, le champ électromagnétique rayonné par chacun des sous-systèmes (bobinages, capacités, ...) est représenté comme une source équivalente localisée, identifiée par mesures ou par calcul ; cette source est ensuite utilisée pour calculer le couplage avec les différents autres éléments, en fonction de leurs positions respectives.

Une méthodologie originale a été mise en place dans un large cadre collaboratif franco-brésilien (dans le cadre du LIA [Maxwell](#), avec une véritable collaboration tripartite USP / G2ELab / Ampère, commencée en 2008) pour valider ces idées, puis pour permettre la mise en œuvre effective d'identification de sources. Elle s'appuie d'une part sur des développements de la source en harmoniques sphériques (avec l'arsenal mathématique permettant d'en déduire les couplages en fonction du placement), d'autre part sur la conception d'un banc de mesures spécifique dont la géométrie permet le filtrage de ces harmoniques [3].

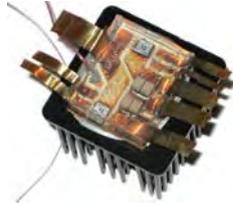


Prototype de boucles filtrant les Harmoniques Sphériques (2011)

2. Conception sous contraintes de CEM

Filtrage en environnement sévère

Les études menées sur les composants discrets ont permis d'évaluer l'influence de la température sur les composants magnétiques et les condensateurs. Un choix approprié a permis la réalisation d'un filtre CEM discret pouvant fonctionner à 200 °C.



Prototype de module de puissance incluant des JFET en SiC avec capacités de mode commun intégrées.

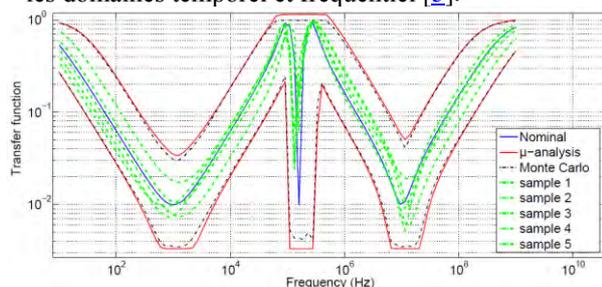
Une première étape d'intégration a ensuite été franchie en réalisant un module de puissance intégrant en son sein des condensateurs discrets de mode commun en céramique [4]. Les technologies de packaging utilisées ont été validées jusqu'à 250 °C (JFETs SiC reportés sur un DBC en Al_2O_3 avec une brasure $Sn_{10}Pb_{88}Ag_2$). Cette étude, menée également en simulation, a permis de mettre en évidence l'intérêt d'un pré-filtrage au plus proche de la cellule de commutation et donc des sources de perturbations.

Intégration des éléments de filtrage et optimisation du placement

Les couplages électromagnétiques entre composants passifs sont une cause essentielle de diminution des performances des filtres CEM. Nous avons initié un travail de modélisation du champ magnétique proche émis par les condensateurs et inductances afin d'optimiser le placement relatif des différents composants. En maîtrisant ainsi les inductances mutuelles, nous avons pu montrer qu'il était possible d'améliorer les performances des filtres au lieu de constater une dégradation.

Prise en compte des incertitudes

Le couplage des outils de modélisation CEM existants est effectué avec des méthodes permettant d'évaluer l'impact sur la signature CEM des incertitudes sur les paramètres des modèles. Les méthodes de propagation d'incertitudes (chaos polynomial, Adaptive Unscented Transform, μ -analyse...) dans les modèles sont non intrusives et très économiques en termes de nombre de réalisations du modèle par rapport à la méthode de Monte Carlo. Ces modèles incertains sont utilisables dans les domaines temporel et fréquentiel [5].



Exemple de résultat (circuit linéaire à 3 branches anti-résonantes et 10 paramètres incertains) : comparaison entre fonction de transfert nominale, 5 tirages aléatoires de paramètres, le résultat Monte Carlo (104 tirages), et le calcul direct du pire cas obtenu par μ -analyse.

D. Positionnement, collaborations et partenariats

Cette activité est transverse entre les départements MIS (méthodes pour l'ingénierie des systèmes) et EE (énergie électrique) du Laboratoire, ce qui se traduit en particulier par l'étude spécifique de convertisseurs utilisant des composants en SiC. L'implication du département EE a notamment permis l'accès à des JFET qui ne sont pas largement disponibles sur le marché, et l'utilisation pour la conception de modèles de composants développés au sein du laboratoire. L'étude de l'impact sur la CEM de l'introduction de composants en SiC est peu abordée dans la littérature disponible, et correspond à une attente industrielle forte. Ces travaux sont originaux dans le paysage français, et participent à notre reconnaissance internationale (LIA [Maxwell](#)). Les collaborations industrielles sont nombreuses notamment au travers de thèses CIFRE (Valéo, Safran Power, ST Microelectronics) et d'une implication forte dans des projets ANR et FUI (sur les 4 dernières années : 4 ANR et 1 FUI) dans lesquels on trouve aussi les autres laboratoires français travaillant sur la CEM en électronique de puissance (Satie, G2ELab, IRSEEM). Cette activité correspond à un des thèmes du laboratoire commun [IPES](#).

E. Faits marquants

- ✓ Novembre 2013 : Ampère et le groupe Safran inaugurent à Lyon leur laboratoire commun « [IPES](#) » (Intégration de Puissance en Environnement Sévère), aboutissement logique d'une longue collaboration, dont la CEM est l'un des axes forts.
- ✓ Démonstration de la réduction du bruit de mode commun obtenue en insérant des capacités dans le module électronique, au plus près de la source de bruit. Collaboration DGA/Hispano (Safran)/CPES.

F. Références

- [1] E. Rondon, F. Morel, C. Vollaie, J.-L. Schanen : "Modeling of a Buck Converter With a SiC JFET to Predict EMC Conducted Emissions" - [IEEE T-Power El. 29/5](#) (2014).
- [2] R. Mrad, F. Morel, G. Pillonnet, C. Vollaie *et al.* : "N-Conductor Passive Circuit Modeling for Power Converter Current Prediction and EMI Aspect" - [IEEE T-EMC, 55/6](#) (2013).
- [3] S. Zangui, K. Berger, M. Ferber, B. Vincent *et al.* : "Using equivalent emission sources to evaluate the coupling between components" - [IEEE T- Mag. 48/2](#) (2012).
- [4] R. Robutel, C. Martin, C. Buttay *et al.* : "Design and Implementation of Integrated Common Mode Capacitors for SiC-JFET Inverters" - [IEEE T-Power El. 29/7](#) (2014).
- [5] M. Ferber, C. Vollaie, J.L. Coulomb *et al.* : "Conducted EMI of DC-DC converters with parametric uncertainties" - [IEEE T-EMC, 55/5](#) (2013).

B. Allard, J. Y. Gauthier, A. Hijazi, X. Lin-Shi, M. T. Pham

A. Résumé

Cette activité concerne principalement la recherche, l'élaboration et la mise en œuvre d'algorithmes de commande pour des convertisseurs électroniques de puissance à commutations, en vue d'améliorer leurs performances et leur efficacité énergétique. L'activité concerne des actions transversales entre le département Méthodes pour l'Ingénierie des Systèmes (MIS) et le département Energie Electrique (EE). L'objectif consiste à développer des outils d'Automatique qui offrent des solutions permettant de répondre à des verrous industriels en tenant compte de contraintes technologiques.

Mots clés : Convertisseurs en électronique de puissance; commande hybride, commande prédictive; intégration de commandes (DSP, FPGA, ASIC).

B. Introduction/contexte

Les convertisseurs de tension ou de courant, à commutations, sont largement utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie électrique. Pour des dispositifs embarqués ou intégrés, tels les systèmes nomades, des défis sont encore plus importants pour améliorer leurs performances fonctionnelles et leur efficacité énergétique, car les contraintes technologiques sont beaucoup plus sévères.

En associant les compétences dans les domaines de l'Automatique et de l'Electronique de Puissance Intégrée, nous avons dirigé cette activité de recherche suivant plusieurs directions :

- développement de méthodologies d'analyse et de synthèse de commande (analogique et numérique) pour la conception de systèmes intégrées (Thèses [Labbe](#), [Branca](#) et Ratiu) ;
- intégration de lois de commande ou d'observateurs sur FPGA et ASIC (th. [B. Li](#) et [N. Li](#)) ;
- proposition de commandes performantes visant à améliorer l'efficacité énergétique des convertisseurs (Thèse [Meghnous](#)) ;
- recherche théorique plus en amont autour de lois de commande et d'observateurs pour étendre les champs d'applications ([Meghnous](#)).

C. Description activité

1. Méthodologies d'analyse et de synthèse

Afin de réduire la consommation énergétique des composants numériques complexes (au sein des systèmes nomades), des techniques de modulation dynamique de la tension d'alimentation et de la fréquence de fonctionnement du cœur de calcul numérique sont utilisées. L'alimentation du cœur doit donc faire face à de forts transitoires de charge, de tension de référence et de tension de source. Cette alimentation est assurée par la cascade d'un convertisseur DC/DC connectée à une batterie et de

convertisseurs DC/DC disséminés au sein du circuit intégré numérique. La commande par mode de glissement à fréquence de découpage fixe du convertisseur DC/DC amont a été proposée avec une nouvelle structure de régulation de fréquence de découpage moyenne du convertisseur. Cette structure permet de maintenir la réponse transitoire du convertisseur asynchrone par rapport à l'horloge de référence [1]. Une analyse de stabilité qui prend en compte les spécificités d'un tel système est aussi proposée. Un autre exemple concerne l'alimentation en tension bipolaire d'amplificateurs audio pour l'application « casque » des plateformes mobiles [2]. Une étude comparative en termes de rendement énergétique, de l'empreinte sur la plateforme et du coût en composants passifs externes des architectures existantes nous a conduit à choisir un convertisseur DC/DC avec une architecture SIBO (Single Inductor Bipolar Outputs). Le convertisseur SIBO est modélisé comme un système double-entrées, double-sorties couplées. Des simulations permettent de transformer un flux audio en courbe de courant absorbé par l'amplificateur audio, c'est-à-dire la charge réelle vue par le convertisseur. En utilisant les théories d'analyse et de synthèse pour des systèmes multi-variables, nous avons identifié des cas critiques liés à des profils de charge réelle du convertisseur, puis proposé des solutions analogiques pour découpler le système et étudié la limite ainsi que la robustesse de ces solutions.

2. Intégration numérique de commande

Les technologies avancées de semi-conducteur permettent de mettre en œuvre des contrôleurs numériques dédiés aux convertisseurs à découpage, de faible puissance et de fréquence de découpage élevée, sur FPGA et ASIC. L'objectif vise à proposer des contrôleurs numériques de performances élevées, de faible consommation énergétique et qui peuvent être implémentés facilement. Nous avons développé un nouveau contrôleur numérique DDP (Digital Dual-state-variable Predictive controller) pour la structure abaisseur de tension. Sur le principe de la commande prédictive, il introduit une nouvelle variable de commande qui est la position de la largeur d'impulsion permettant de contrôler de façon simultanée le courant dans l'inductance et la tension de sortie. La solution permet une dynamique très rapide en transitoire, aussi bien pour une variation de la charge que pour des changements de tension de référence. Les résultats expérimentaux portés sur FPGA vérifient les performances de ce contrôleur jusqu'à une fréquence de découpage de 4MHz. Deux circuits ASICs ont été portés en CMOS 0,35 μ m où plusieurs lois de commande sont intégrées (Fig.1). Un modèle de puissance a été établi afin d'estimer la consommation électrique des commandes numériques. Les prototypes illustrent la pertinence d'une commande complètement numérique pour des convertisseurs abaisseurs ou élévateurs de tension, de puissance de sortie supérieure à 400mW, pour un rendement de 90%, avec l'avantage d'une meilleure performance et une meilleure flexibilité comparées aux solutions analogiques.

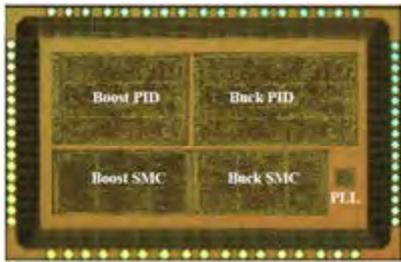


Fig.1 : Layout en technologie standard CMOS 0,35 μm d'un PID et d'une commande par mode de glissement pour un convertisseur abaisseur et un convertisseur élévateur

Dans un autre contexte, afin de réduire le nombre de capteurs, un observateur de Kalman étendu a été porté sur FPGA pour un convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) de 500 kHz de découpage (Fig. 2).

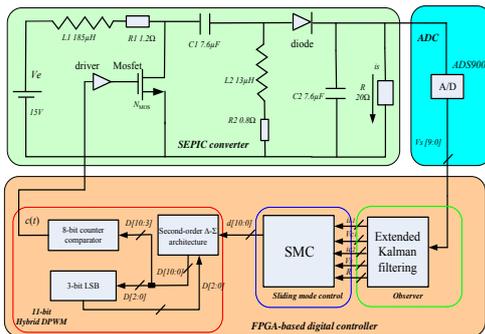


Fig.2 : Commande numérique par mode de glissement avec un observateur de Kalman étendu pour un convertisseur SEPIC.

3. Commandes prédictives directes

Depuis une dizaine d'années, le laboratoire Ampère s'intéresse à la commande de convertisseurs à commutation en utilisant les techniques de commandes prédictives directes. Cette technique repose sur une modélisation simplifiée, valable sur un horizon court de décision. Une stratégie de commande détermine directement les configurations des interrupteurs sans passer par des techniques de modulation. Pour la commande d'un convertisseur multicellulaire, nous avons pris en compte les pertes par commutation des interrupteurs dans la stratégie de choix (Fig. 3). Ce qui permet d'agir directement sur le compromis efficacité / performances transitoires du convertisseur [4].

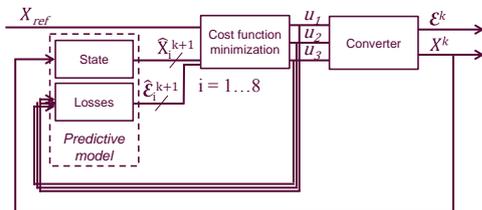


Fig.3: Commande prédictive directe pour un convertisseur multicellulaire prenant en compte des pertes par commutation.

4. Commandes pour les systèmes commutés

Les convertisseurs de puissance à commutations constituent une des classes de Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH) où les aspects continus et événementiels sont intrinsèquement liés. Afin de développer des méthodes plus générales pour cette classe de systèmes, nous nous intéressons

à la commande et à la synthèse d'observateurs (voir la [fiche MIS 4](#) pour les observateurs) s'appuyant sur le formalisme Hamiltonien. Plusieurs commandes ont été proposées : deux de type Lyapunov, synthétisées respectivement à partir du modèle moyen et du modèle hybride ; une commande optimale hybride en utilisant le principe du maximum de Pontryagin [5] ; une commande prédictive hybride établie à partir d'un modèle discrétisé du système. Ces commandes sont faciles à implémenter et ouvrent une perspective intéressante pour les systèmes commutés à fréquence de commutation faible, comme par exemple les systèmes électropneumatiques munis d'électrovannes (voir les applications dans la [fiche MIS 5](#)).

D. Positionnement, collaborations, ...

Collaborations nationales et internationales :

- Supélec, ST-Ericsson, CEA
- Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences (IMECAS), Pékin, Chine
- Pontificia Univ. Javeriana, Bogotá, Colombie

E. Faits marquants

Les recherches menées dans le domaine de l'électronique intégrée (alimentation à très faible puissance) sont originales, notamment :

- ✓ la démonstration de la pertinence d'une commande complètement numérique pour des convertisseurs de puissance de faible consommation énergétique ([thèse B. Li](#)) et
- ✓ la validation expérimentale sur un circuit en technologie CMOS 130 nm de la nouvelle structure de régulation de fréquence de découpage d'un convertisseur DC/DC contrôlé en mode glissant ([th. Labbe](#)).

F. Références

- [1] B. Labbe, B. Allard, X. Lin-Shi, D. Chesneau, "An Integrated Sliding-Mode Buck Converter With Switching Frequency Control for Battery-Powered Applications". IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 28 n°9, 2013, pp. 4318 – 4326.
- [2] X. Branca, B. Allard, X. Lin-Shi, D. Chesneau, "Single-inductor bipolar-outputs converter for the supply of audio amplifiers in mobile platforms", IEEE Trans. on Power Electronics. Vol. 28 n°9, 2013, pp. 4248 – 4259.
- [3] B. Li, X. Lin-Shi, B. Allard, J.M. Rétif, "A digital dual-state-variable predictive controller for high switching frequency buck converter with improved sigma-delta DPWM", IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 8 n°3, 2012, pp. 472-481
- [4] J. Y. Gauthier, X. Lin Shi, A. Avramoae, "Predictive control with efficiency optimization and normalization for a multilevel converter", Proceedings of SLED PRECEDE 2013.
- [5] A. Meghnous, D. Patino, M.T. Pham, X. Lin-Shi, "Hybrid optimal control with singular arcs for DC-DC power converters", IEEE Control Systems Society Conference CDC 2013.

Inter Département MIS/BioIngénierie

D. Voyer, N. Burais, O. Fabrègue, L. Krähenbühl, R. Perrussel, R. Scorretti, C. Vollaïre

A. Résumé

La dosimétrie numérique des champs électromagnétiques consiste à quantifier le niveau de champs dans le corps humain dans le cadre d'une exposition indésirable (champs électrique induit par la proximité de systèmes électriques, courants de contact) ou volontaire (IRM, électrochimiothérapie...). Le groupe BMS développe des modélisations numériques pour étudier ces deux situations d'exposition. Une attention particulière est consacrée à la prise en compte des incertitudes, qui dans ce contexte applicatif sont particulièrement importantes.

Cette activité s'inscrit dans le cadre plus général de la modélisation en électromagnétisme, activité historique fondatrice du Laboratoire Ampère (menée avec le Département MIS).

Mots clés : Dosimétrie, Fantômes numériques, Incertitudes, Homogénéisation, Asymptotiques, Calcul efficace.

B. Introduction/Contexte

L'exposition humaine aux champs électromagnétiques peut être non souhaitée, comme c'est le cas lorsqu'on se trouve à proximité des systèmes électriques en fonctionnement tels que lignes haute-tension ou des dispositifs antivol. A moins que le niveau de champ ne soit extrêmement intense, cette exposition n'est même pas ressentie par l'individu : néanmoins la question de savoir quels sont les effets à long terme est toujours objet de controverse. Il existe de nombreuses recherches qui visent à mieux comprendre les effets biologiques de l'exposition à long terme à des champs électromagnétiques de faible niveau (courants de contact, proximité de lignes HT), ou d'effets à court terme provoqués par des champs de forte intensité. Ces études se heurtent à de nombreuses difficultés expérimentales, telles que l'impossibilité de mesurer directement et ponctuellement les champs induits dans le corps ou la quantification de modifications de la perception sensorielle (magnétosphères, sensation de goût « métallique » à l'intérieur de systèmes IRM). Ces études expérimentales sont généralement déconnectées d'une dosimétrie fine des champs : la dosimétrie se limite à la détermination du niveau d'exposition, mais dans la plupart des cas elle ne contribue pas à expliquer les phénomènes biologiques en tant que tels. Dans ce contexte d'incertitude, les pouvoirs publics mettent à jour des réglementations pour limiter l'exposition humaine aux champs électromagnétiques.

Dans d'autres cas, et en particulier pour des applications médicales ou pour certains métiers de l'industrie, l'exposition aux champs est volontaire : la dosimétrie numérique est alors un outil d'ingénierie indispensable pour le développement de systèmes fiables et performants (planification d'actes médicaux, électrochimiothérapie...).

Les branches de l'industrie concernées par cette activité sont d'une part certaines industries lourdes (transport et production d'énergie, véhicules électriques), et d'autre part le secteur biomédical.

C. Description activité

1. Aspects numériques

Les méthodes numériques pour la dosimétrie sont assez bien établies, en particulier pour les basses fréquences ; néanmoins certains aspects méritent d'être approfondis. Un « point dur » dans la dosimétrie numérique est la fiabilité des résultats, aucun calcul réalisé chez l'homme n'ayant pu être validé par expérience. Il est communément admis que la source d'erreur la plus importante est la méconnaissance des propriétés diélectriques des tissus (voir §3) ; mais nous avons aussi travaillé sur la quantification de l'erreur purement numérique, dans le cas des fréquences ELF (< 300 Hz), ou bien en utilisant deux formulations Eléments Finis duales [4], ou bien avec un estimateur résiduel qui ne requiert qu'un calcul. Les résultats obtenus devraient permettre de mettre en place des stratégies adaptatives de raffinement local de la discrétisation.

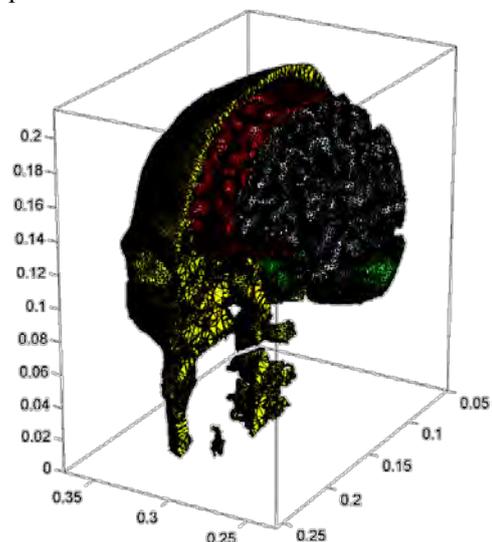


Fig. 1. Maillage en vue explosée d'une tête humaine (« Duke »).

2. Maillage de fantômes anatomiques

Le fantôme¹ de calcul est un élément fondamental dans les calculs dosimétriques. Pour exploiter au mieux la versatilité dans la représentation de la géométrie offerte par la méthode des éléments finis, il est nécessaire générer des maillages du corps humain à partir d'une représentation surfacique de ce dernier, ou d'images en voxels labélisées. Si la génération de maillages limités à une partie du corps, ou avec un sous-ensemble limité d'organes est une tâche relativement facile, il est plus difficile de générer des maillages du corps entier à cause de la grande complexité géométrique, qui peut entraîner des problèmes d'instabilité des algorithmes de maillage. Nous avons pu générer plusieurs maillages hétérogènes du corps complet à partir des modèles en voxel faisant partie de la *Virtual Family* (IT'IS foundation) et les exploiter dans nos calculs dosimétriques (Fig. 1). La génération de maillages

¹ En dosimétrie on appelle « fantôme » un modèle du corps humain, de nature matérielle ou numérique.

de qualité est le point de départ pour des recherches futures, notamment sur les effets de la variabilité morphologique sur la dosimétrie, ou encore la construction rapide de modèles numériques ajustés à un individu particulier, en vue de la planification d'interventions cliniques.

3. Propriétés diélectriques des tissus

Un verrou en dosimétrie numérique est la méconnaissance des propriétés diélectriques des tissus, avec dans la littérature des variations de plusieurs ordres de grandeurs². Cette méconnaissance s'explique par des limitations expérimentales (polarisation d'électrodes en basse fréquence, rayonnement parasite en haute fréquence), par un certain degré de variabilité intrinsèque, et par la rapidité de dégradation des propriétés des tissus après son excision, ou après la mort. Nous avons donc mis en œuvre des méthodes permettant de quantifier l'effet de l'incertitude des propriétés diélectriques sur les résultats des calculs dosimétriques [1], [2]. Chaque paramètre incertain ajoutant une dimension au problème à résoudre (exemple : géométrie 3D + 4 paramètres inconnus = 7 dimensions), le nombre de calculs nécessaires devient vite prohibitif. Pour surmonter cette difficulté, nous avons utilisé des schémas d'intégration par grilles creuses et des méthodes de bases réduites [3]. Ces mêmes méthodes s'appliqueront aussi à l'étude des effets des variabilités morphologiques [5]. Par ailleurs, nous développons une approche alternative qui devrait permettre à long terme de remonter aux propriétés des tissus, à partir d'expériences d'électrorotation menées sur les agrégats de cellules (thèse El-Gaddar, 2014).

4. Activités « amont » en modélisation

Parallèlement à nos recherches en dosimétrie numérique, nous menons des travaux plus « génériques » en modélisation numérique, avec le Département MIS. Très transversale en interne, cette activité représente aussi une ouverture importante pour des collaborations y compris hors de France et avec des mathématiciens (LIA Maxwell, Rennes, Toulouse, Liège, INRIA Bordeaux et Pau). L'idée générale poursuivie est l'amélioration de la précision et de la rapidité des simulations, et plusieurs voies complémentaires sont suivies : travaux sur les grands systèmes linéaires (multigrilles, ...); traitement efficaces des incertitudes de données (évoqué plus haut), des « singularités » (milieux très minces, coins et arrondis, ... [6]); homogénéisation de milieux complexes, périodiques ou composites; méthodes de « perturbations »

Les méthodes étudiées peuvent coupler leurs efficacités : par exemple, un modèle de milieu mince (ou d'angle arrondi) conduit à un paramétrage de son épaisseur (de son rayon), ce qui permet de prendre en compte l'incertitude sur la petite dimension en post-traitement, par méthodes

asymptotiques. La méthode des perturbations, conçue au départ pour permettre la prise en compte de détails dans un très gros problème, s'applique aussi à la prise en compte d'incertitudes, tant sur des valeurs de propriétés que sur la forme des objets modélisés.

D. Positionnement, collaborations et partenariats

Notre groupe est reconnu en France via ses partenariats industriels et académiques, et au niveau international par ses nombreuses publications et exposés invités. En particulier, nous travaillons depuis longtemps avec EDF sur la dosimétrie des champs ELF et sur la réglementation. Nous avons également des partenaires académiques, dans le cadre d'un projet sur l'électrochimiothérapie (ANR « [Memove](#) » [7]), et nous faisons partie du [Labex PRIMES](#) consacré à la physique, l'imagerie et la simulation numérique pour la médecine.

E. Faits marquants

- ✓ Génération de maillages réalistes haute résolution (1.5 mm) du corps entier.
- ✓ Etude des effets de l'incertitude sur les propriétés de 4 tissus (8 paramètres) dans une simulation d'exposition au champ rayonné par un téléphone mobile
- ✓ En modélisation numérique, importantes avancées théoriques sur les solutions statiques et quasi-statiques vers les angles et sur la paramétrisation des solutions CF à faible pénétration.

F. Références

[1] M.A. Drissaoui, S. Lanteri, P. Lévêque, F. Musy, L. Nicolas, R. Perrussel, D. Voyer (2012). "A stochastic collocation method combined with a reduced basis method to compute uncertainties in numerical dosimetry". [IEEE T-Mag. 48/2, 563-566](#).

[2] R. Gaignaire R., Scorretti, R. Sabariego, C. Geuzaine (2012). "Stochastic Uncertainty Quantification of Eddy Currents in the Human Body by Polynomial Chaos Decomposition". [IEEE T-Mag. 48/2, 451-454](#).

[3] R. Perrussel, D. Voyer, L. Nicolas, R. Scorretti, N. Burais (2011). "Domain decomposition for computing extremely low frequency induced current in the human body". [IEEE T-Mag. 47/5, 886-889](#).

[4] R. Scorretti, R. Sabariego, L. Morel, C. Geuzaine, N. Burais, L. Nicolas (2012). "Computation of induced fields into the human body by dual finite element formulations". [IEEE T-Mag. 48/2, 783-786](#).

[5] Drissaoui, A., Musy, F., Nicolas, L., Perrussel, R., Scorretti, R., & Voyer, D. (2012, July). "Propagation de l'incertitude sur la géométrie en dosimétrie numérique". Actes de Numelec, juillet 2012.

[6] M. Dauge, P. Dular, L. Krähenbühl, V. Péron, R. Perrussel, C. Poignard: "Corner asymptotics of the magnetic potential in the eddy-current model". [MMAS, RR-8204](#), août 2013.

[7] M. Breton, F. Buret, L. Krähenbühl, M. Leguèbe, L. Mir, R. Perrussel, C. Poignard, R. Scorretti, D. Voyer. "Nonlinear steady-state electrical current modeling for the electroporation of biological tissue". Proc. of CEFC, Mai 2014.

² Par exemple, pour la graisse on trouve des valeurs de conductivité à 100 Hz comprises entre 0.0015 et 0.03 S/m (*Modelling the human body exposure to ELF electric fields*, WIT press, pag. 31).