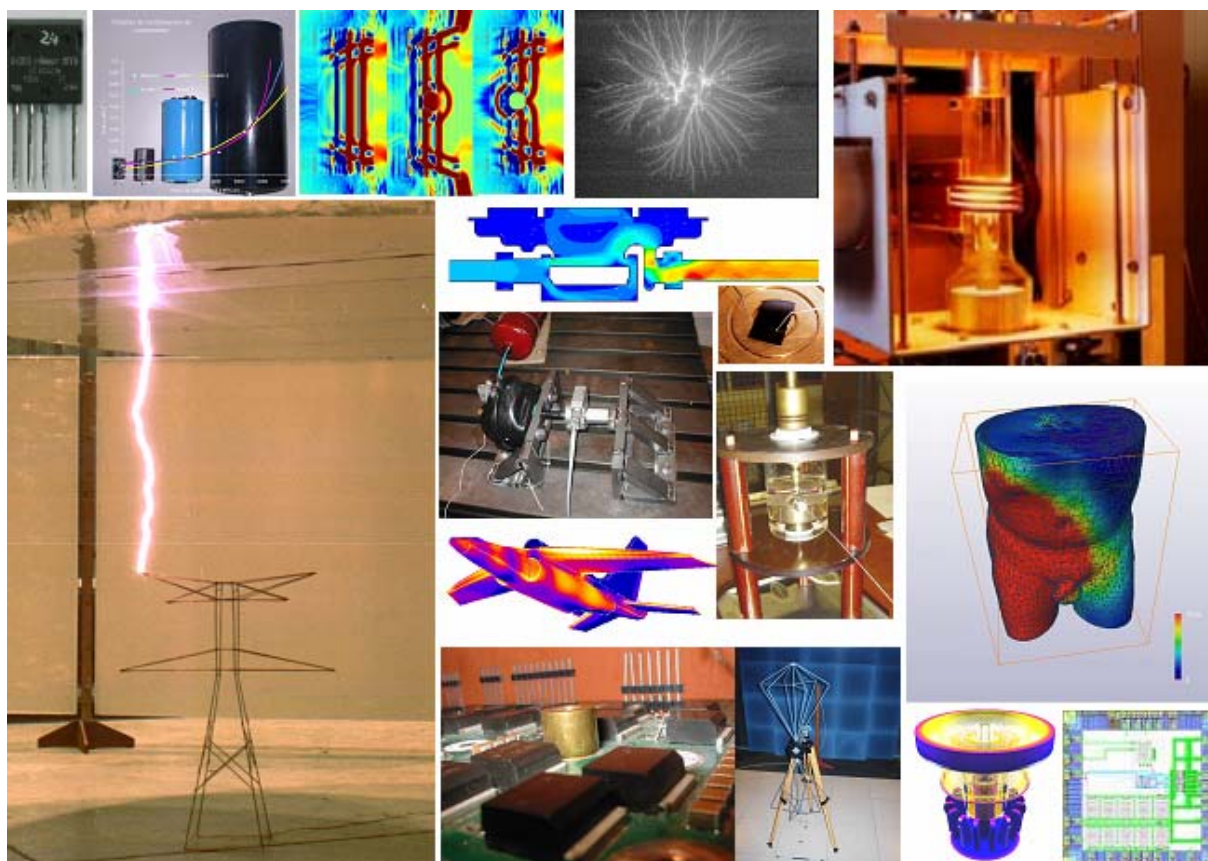


# Laboratoire Ampère

UMR CNRS 5005

Génie électrique, Electromagnétisme, Automatique,  
Microbiologie environnementale et Applications

## Bilan scientifique 2007-2010



ÉCOLE  
CENTRALE LYON





## Table des matières

---

Table des matières .....	1
Bilan des activités du laboratoire et données synthétiques .....	3
Activité scientifique et organisation.....	4
Ampère et son environnement.....	9
Données synthétiques et principaux indicateurs .....	12
Autoévaluation et analyse SWOR .....	15
Bilan des activités des équipes .....	17
Equipe Actionneurs et Systèmes.....	18
Equipe Commande .....	25
Equipe Electronique de puissance et intégration .....	31
Equipe Matériaux.....	38
Equipe Microsystèmes et microbiologie .....	44
Equipe Modélisation.....	51
Fiches scientifiques .....	57
Annexes.....	A1
Plan de formation de l'Unité.....	A2
L'hygiène et la sécurité au laboratoire Ampère .....	A7
Production scientifique.....	A8

**Nota bene** : ce rapport d'activité scientifique est à 3 niveaux de lecture :

- Un 1<sup>er</sup> niveau dresse le bilan général du laboratoire. Il se focalise sur sa spécificité, et donne des résultats chiffrés concernant l'activité scientifique.
- Dans le second niveau, un rapide bilan des activités de chaque équipe est donné, en terme d'activité générale et de pertinence scientifique. Une analyse SWOR des équipes est également présentée.
- Enfin, le troisième niveau se focalise sur les activités scientifiques majeures du laboratoire, présentées sous forme de fiches scientifiques.



# ***Bilan des activités du laboratoire et données synthétiques***

---

***Activités scientifique et organisation***

***Ampère et son environnement***

***Données synthétiques et principaux indicateurs***

***Autoévaluation et analyse SWOR***

## Activité scientifique et organisation

Le Laboratoire Ampère a été créé au 1<sup>er</sup> janvier 2007, par la fusion du CEGELY (Centre de Génie Electrique de Lyon) et du LAI (Laboratoire d'Automatique Industrielle de Lyon), et l'intégration de chercheurs spécialisés en microbiologie environnementale. Il se situe donc à la croisée de trois disciplines : le Génie Electrique, l'Automatique, et la Microbiologie Environnementale, avec une volonté forte de développer des recherches aux interfaces tout en conservant une excellence dans les disciplines de base.

### Objectif scientifique

L'objectif général des recherches menées à Ampère, tel que défini en 2007, consiste à **gérer et utiliser de façon rationnelle l'énergie dans les systèmes en relation avec leur environnement**. Si l'énergie, ou plus exactement le vecteur qui permet le transport de l'énergie, peut être électrique, pneumatique ou hydraulique, le dénominateur commun de ces recherches réside dans les méthodes de traitement de l'énergie et de traitement de l'information, qui sont à la base identiques quel que soit le type d'énergie. Les systèmes étudiés ou utilisés sont généralement multiphysiques. Enfin, la relation de ces systèmes entre eux ou avec leur environnement est fondamentale, et il est indispensable de savoir gérer leurs interactions.

Cet objectif se décline selon 8 axes scientifiques :

- Gestion d'énergie: l'usage rationnel de l'énergie ouvre des problématiques concernant la génération multi-sources de l'énergie, à partir de diverses sources hétérogènes, et sa gestion au plus proche des consommateurs. L'objectif consiste à développer des recherches dans ces deux directions, en étudiant en particulier les problèmes de disponibilité, d'autonomie et de puissance crête disponible, et en proposant des méthodologies innovantes pour gérer efficacement le couple production-consommation. Les applications vont des systèmes nomades à l'habitat, en passant par les sites autonomes.
- Intégration de puissance en SiC : l'amélioration des performances en électronique de puissance passe par l'intégration, qui est aujourd'hui le moteur de la recherche industrielle et scientifique. Le carbure de silicium offre d'excellentes perspectives en terme d'isolation électrique, de refroidissement, de température de fonctionnement et de capacité d'intégration hétérogène ou monolithique. L'objectif recherché est la modélisation, la conception, la réalisation et la caractérisation de nouveaux composants et de nouvelles structures de convertisseurs exploitant les possibilités offertes par le carbure de silicium. Les applications visées vont de l'aérospatiale, le forage, l'aéronautique, le transport ferroviaire, les réseaux électriques de distribution jusqu'à l'automobile et la domotique.
- Matériaux dans les systèmes électriques: le comportement des matériaux dans les matériels et systèmes électriques est à la base de leurs performances. L'objectif est l'approfondissement des connaissances sur les phénomènes dans les matériaux, leur caractérisation et leur modélisation. Cela concerne les matériaux diélectriques et les phénomènes de préclaquage et de claquage dans les gaz, liquides et solides industriels, actuels et surtout futurs, qui seront plus écologiques. Cela concerne également les matériaux magnétiques, actuels et nouveaux, pour lesquels une caractérisation fine et une modélisation comportementale temporelle sont nécessaires en vue d'une utilisation dans les actionneurs rapides ou les éléments à haute intégration
- Méthodes et outils génériques de modélisation : il s'agit de développer des outils numériques génériques, mettant en oeuvre des modèles physiques multiples (multi-physique : au-delà de l'électromagnétisme, la thermique, la mécanique des fluides, les transports de charges, ...), avec des différences d'échelle dans les systèmes (multi-échelle), et couplant différentes méthodes (multi-méthode), tout en prenant en compte l'incertitude sur la valeur des paramètres, ou leurs possibles variations. Il s'agit également de participer au développement des méthodes de conception, de dimensionnement, d'optimisation et de résolution de problèmes inverses, associées à ces outils génériques.
- Systèmes à fluides sous pression et robotique médicale : est abordé ici le Fluid Power, c'est à dire l'ensemble des technologies et des techniques de contrôle de la transmission de puissance par l'intermédiaire d'un fluide sous pression (huile, eau, gaz). Les objectifs visés sont la modélisation multi-échelles dans le but d'obtenir un modèle de type "système" des composants ou des dispositifs, l'étude de la commande des actionneurs électropneumatiques et électrohydrauliques hautes performances, et la conception de micro-actionneurs et de

micro-systèmes de pilotage à fluide sous pression pour des applications en robotique médicale et dans le domaine des transports.

- Systèmes mécatroniques et embarqués : il s'agit de développer de nouvelles méthodes de conception, de surveillance et de pilotage des systèmes multi-domaines. Ces méthodes doivent intégrer au plus tôt les contraintes fonctionnelles, comportementales, de sûreté, mais également les incertitudes et le caractère hétérogène des systèmes. Ces systèmes multi-actionnés, multi-alimentés et multi-pilotés, ou plus simplement systèmes mécatroniques et embarqués, sont issus pour l'essentiel de domaines applicatifs comme les transports terrestres et aériens, l'électronique de commande et de gestion de l'information.
- Electromagnétisme et vivant : l'objectif est de progresser dans la connaissance et la maîtrise des effets des champs électromagnétiques sur le vivant pour, suivant le contexte d'application, soit améliorer leurs apports, soit limiter leurs effets. Ces recherches transversales s'appuient sur une approche des phénomènes à différentes échelles, de la membrane de la cellule au corps humain complet, en passant par les tissus, les organes, .. Elles associent modélisation multi-physique, modélisation multi-échelle et caractérisation biologique.
- Microbiologie et environnement : les recherches menées vont des mécanismes fondamentaux de l'adaptation bactérienne aux perturbations environnementales dues à l'activité humaine. D'importantes questions sociétales sont traitées, telles que le devenir des transgènes provenant des plantes transgéniques, la recherche de nouveaux médicaments ou la bioremédiation de sols contaminés.

La démarche développée au laboratoire Ampère consiste à comprendre les phénomènes physiques et à les modéliser afin de concevoir des systèmes par nature complexes : c'est donc une **démarche générale d'ingénierie**. Il s'agit de faire avancer la connaissance, en développant des recherches à caractère fondamental, ou de résoudre des problèmes plus appliqués à fort enjeu sociétal ou technologique.

### Un point fort du laboratoire : la pluri- et l'inter-disciplinarité

Le Laboratoire Ampère se situe à la croisée de trois disciplines, le Génie Electrique, l'Automatique, et la Microbiologie Environnementale, avec une volonté forte de développer des recherches aux interfaces, tout en conservant une excellence dans les 3 disciplines de base. Deux projets démarrés depuis la fusion montrent que cette pluri- et inter-disciplinarité est bien réelle, et qu'elle est la véritable caractéristique du Laboratoire Ampère :

- Les recherches sur les piles à combustibles microbiennes (ou biopiles) nécessitent des compétences en microbiologie pour la compréhension des phénomènes fondamentaux et l'étude des couples bactérie - nutriment, en physicochimie pour les électrodes, et en génie électrique pour l'efficacité énergétique et leur insertion dans un système électrique complet.
- Le projet HYBUS, labellisé par le pôle de compétitivité LUTB 2015, vise à évaluer un stockage de forte puissance de type supercondensateur pour des hybridations de première génération sur des véhicules électriques « trolleybus » : il s'agit alors d'associer des compétences en Génie Electrique et en Automatique, et plus particulièrement en intégration de puissance, en système de stockage, en matériaux, en méthode de dimensionnement énergétique, ainsi qu'en commande de systèmes électriques.

Deux indicateurs montrent que pluri- et inter-disciplinarité sont bien une réalité à Ampère:

- Indicateur financier : sur 2007-2008, ce sont 13 % des crédits sur projets qui sont à coloration pluridisciplinaire

Moyenne annuelle 07-08	Automatique	Génie électrique (GE)	Microbiologie environnementale (ME)
Automatique	327 k€ (12%)	199 k€ (7%)	0
Génie Electrique		1250 k€ (46%)	165 k€ (6%)
Microbiologie			765 k€ (28%)

Ce tableau montre que si les collaborations GE-Automatique et GE-ME sont bien réelles, il reste à construire le lien entre Automatique-ME. Ceci est somme toute logique compte tenu de la jeunesse d'Ampère et de son histoire, avec un rôle central du GE dans la fusion.

- Indicateur sur les publications : sur 2007-2009, ce sont 10% des communications internationales à comité de lecture et 4% des revues internationales à comité de lecture publiées par Ampère qui impliquent 2 disciplines

Moyenne annuelle 07-08	RICL			CICL		
	Automatique	Génie électrique	Microbiologie	Automatique	Génie électrique	Microbiologie
Automatique	10 (17%)	2 (3%)	0	40 (35%)	5 (4%)	0
Génie Electrique		33 (57%)	1 (1%)		55 (48%)	7 (6%)
Microbiologie			13 (23%)			9 (8%)

Il semble normal que la production en terme de RICL soit en retard, les travaux étant généralement plus lents à valoriser de cette manière qu'à travers des conférences.

La participation forte d'Ampère au programme interdisciplinaire « Ingénierie écologique » du CNRS (<http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes/ingenierieeco/ingenierieeco.htm>) illustre également très bien cette dimension interdisciplinaire à la croisée de l'ingénierie et de l'environnement :

Année	Titre projet	Montant	Porteur	Description du projet
2007	BioCEI	20 k€	F. Buret	Biodepollution du sol par injection de courant impulsif
	EcoWatt	15 k€	T. Vogel	Production d'électricité par les bactéries
2008	Biopile	15 k€	T. Vogel	Implantation de biopiles sur site pilote
	Genefish	16 k€	P. Simonet	Capture des gènes rares dans le métagénome du sol
2009	Nanogénomique	36 k€	M. Frenea	Greffage de nanoparticules magnétiques sur des molécules d'ADN
	Biopile II	15 k€	T. Vogel	Développement de biopiles en tant que biocapteurs
	Genefish	20 k€	P. Simonet	Suite Genefish

## Structuration

La Laboratoire Ampère est structuré en 6 équipes de recherche :

- L'équipe **Actionneurs et systèmes** a pour objectif le développement des méthodologies et des outils pour la conception, la spécification et l'analyse des performances de systèmes multi-domaines en relation avec leur environnement.
- L'objectif de l'équipe **Commande** est l'adaptation et l'application des techniques modernes de l'Automatique en termes de commande, identification, estimation, observation, filtrage et optimisation sur des procédés physiques en particuliers sur des systèmes mécatroniques.
- L'équipe **Electronique de puissance et intégration** a pour objectif la maîtrise de la conception des composants de puissance et des convertisseurs intégrés.
- L'équipe **Matériaux** a pour objectif la connaissance expérimentale et la modélisation théorique des matériaux isolants et magnétiques, actuels ou en cours de développement, en vue de leur mise en œuvre dans les matériels et systèmes du Génie Electrique, dans des conditions optimisées et compatibles avec l'environnement..
- L'objectif de l'équipe Microsystèmes et microbiologie est double : il s'agit de développer des microdispositifs électromagnétiques dédiés à la manipulation et à la caractérisation de cellules procaryotes ou eucaryotes ; il s'agit également de développer des méthodes pour une analyse métagénomique des communautés bactériennes présentes dans des environnements divers.
- L'équipe **Modélisation** a pour objectif la maîtrise de la conception des systèmes du Génie Électrique, chaque fois que le calcul de la répartition des champs électromagnétiques et son optimisation sont nécessaires.

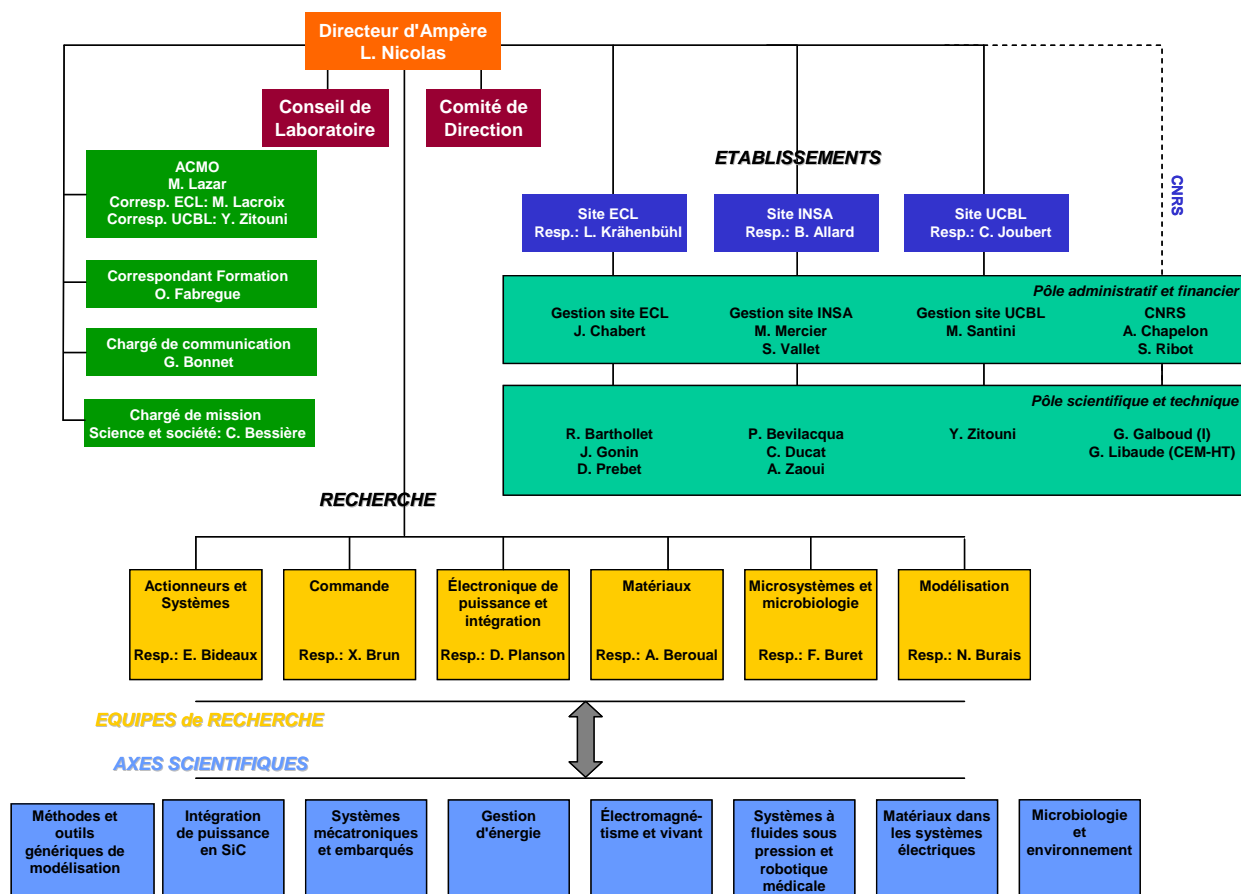
L'orientation des recherches dans chacune de ces équipes constitue donc un objectif commun, partagé par tous les membres de l'équipe. Ainsi l'équipe rassemble les compétences autour d'un thème commun. Les projets de recherche vont être développés entre membres d'une même équipe, ou bien entre membres d'équipes différentes, ou bien encore entre membres d'une équipe du laboratoire et membres d'autres laboratoires.

## Gouvernance

Trois instances participent à la gouvernance du laboratoire



- Le Comité de Direction : il réunit autour du Directeur d'Unité les 3 responsables de sites (ECL, INSA, UCBL) du Laboratoire, ainsi que le gestionnaire du Laboratoire. Il a en charge les questions administratives. La plupart du temps, il est élargi aux membres du Comité Scientifique.
- Le Comité Scientifique : il réunit autour du Directeur d'Unité les 6 responsables d'équipes, ainsi que le chargé de communication du Laboratoire. Ce comité traite des questions scientifiques du Laboratoire.
- Le Conseil de Laboratoire : il est statutaire, son rôle est défini par le Règlement Intérieur de l'Unité.



## Eléments de politique scientifique : appel à projets interne et stratégie d'innovation

Si la recherche sur projets, financée par l'ANR, la FRAE ou autres organismes institutionnels ou privés, a apporté une masse de crédits inconnue jusqu'à présent dans les laboratoires, elle présente cependant deux inconvénients majeurs : les projets sont des recherches à court ou moyen terme et les crédits sont ciblés, si bien qu'aucune latitude n'est possible pour engager des recherches exploratoires à plus long terme. C'est donc réellement une nouvelle stratégie d'innovation scientifique qu'il nous faut aujourd'hui mettre en place.

	1998	2000	2004	2006	2007	2008	2009
Total crédits	484 k€	686 k€	873 k€	1 868 k€	2 330 k€	3 895 k€	4 554 k€
Part des crédits sur projets	82%	83%	84%	91%	91%	94%	95%

C'est pourquoi il a été décidé de prélever une partie de chacun des contrats signés par le laboratoire, afin de pouvoir financer des actions scientifiques amont ainsi que des investissements d'intérêts collectifs. Il faut noter qu'une procédure équivalente avait déjà été mise en œuvre lors du quadriennal 2003-2007, sous le nom *BQR CEGELY* : il s'agissait à l'époque de financer des projets amont avec comme source de financement une majeure partie de la subvention CNRS.

Cette décision, prise au Conseil de Laboratoire d'avril 2008, prend effet au 1<sup>er</sup> janvier 2009 :

- Ces prélèvements servent à financer deux types d'actions : des actions scientifiques amont (achat d'équipement, financement de doctorant ou post-doctorant, ...) ainsi que des actions d'intérêts collectifs (embauche d'un administratif, construction, mise en sécurité, ...).
- Le montant du prélèvement est calculé à partir de la part « fonctionnement » de chaque projet, et uniquement sur la partie des crédits revenant au laboratoire.
- Le taux de prélèvement est fixé en principe à 20%, objectif qui doit être atteint pour chacun des projets. Il pourra cependant être réduit, selon les projets et selon la difficulté de mettre en place le mécanisme de prélèvement, la valeur minimale de prélèvement étant fixée à 5%.
- Le prélèvement peut avoir 2 formes : prélèvement financier direct, lorsque cela est possible (sur un contrat industriel par exemple), ou bien achat d'un équipement d'intérêt commun sur un projet pour un montant équivalent à ce qui devrait être prélevé.
- La répartition des crédits mutualisés par ces prélèvements est discutée et validée par le Conseil de Laboratoire, à partir d'un appel à projets interne effectué en début de chaque année.

Il n'est aujourd'hui pas possible de connaître l'efficacité d'un tel mécanisme. Mais une simulation sur les crédits 2007 à 2009 permet d'avoir une idée du montant qui pourra être mutualisé à l'avenir.

	Montant total des crédits	Part fonctionnement	Prélèvement potentiel (20%)
2007	2 330 k€	917 k€	183 k€
2008	3 895 k€	2 546 k€	509 k€
2009	4 554 k€	2 812 k€	562 k€

## Les plates-formes et centres d'essais

Des plates-formes et centres d'essais viennent en appui aux recherches menées au Laboratoire. Suivant les cas, ils peuvent également être utilisés dans le cadre de la formation d'ingénieurs (ECL, INSA), ou dans le cadre de soutien aux PME / PMI de la région Rhône-Alpes.

- Centre d'essai de compatibilité électromagnétique (ECL) : il est composé d'une cage anéchoïque (7.5m x 5m x 3.5m) et d'une instrumentation complète adaptée aux mesures normatives et aux activités de pré-qualification et de recherche. L'anéchoïsation est réalisée par des tuiles de ferrites (1 MHz – 200 MHz) et des mousses stratifiées (200 MHz - 10 GHz).
- Centre d'essai Haute Tension (ECL) : ce centre d'essai est unique en France. La pièce maîtresse est un hall faradisé de 170 m², qui abrite un générateur de choc de 1MV (50 kJ) et un transformateur 200 kV/50 Hz – 50 kVA. Deux autres cages de Faraday (20 m²) abritent respectivement un deuxième générateur de choc 200 kV de plus faible énergie et un générateur continu de 300 kV-15 kVA.
- Laboratoire de microbiologie environnementale (ECL) : installé depuis 2007 principalement sur fonds propres, le laboratoire dispose, outre les équipements classiques de microbiologie, d'une station d'hybridation pour puces à ADN taxonomiques, d'un système d'analyse des lames après hybridation, et de différents robots de redistribution des solutions d'oligosondes.
- Plate-forme diagnostic 45 kW pour les systèmes électriques (UCBL) : elle est équipée d'un banc de machines tournantes 45kW avec mise en place de défauts réversibles sur les rotors, stators, et convertisseurs, d'une machine CC avec hacheur 4 quadrants et d'une machine à encoches instrumentées. Les mesures effectuées sont de type électrique, thermique et mécanique.
- Centre de caractérisation et de fiabilité des systèmes de stockage d'énergie (condensateurs, supercondensateurs, batteries) (UCBL) : il est constitué de plusieurs enceintes climatiques, de moyens de caractérisation fréquentielle (spectromètre d'impédance, impédancemètre, ...) dans la gamme 10 µHz - 40 MHz et temporelle (banc de cyclage 30 V, 500 A) ainsi que de plates-formes de vieillissement spécifiques aux composants testés.
- Centre d'essai Fluid Power (INSA): unique dans le monde universitaire français, ce centre d'essai est constitué de bancs électropneumatiques et électrohydrauliques. Il est équipé d'un compresseur, d'une centrale hydraulique, de systèmes numériques de contrôle-commande, de prototypage virtuel et de différents appareils de mesure et d'enregistreurs pour les études de répétabilité.
- Bancs de caractérisation de composants de puissance (INSA) : les 2 pièces maîtresses sont un banc de mesure sous pointe, qui permet de réaliser des mesures statiques, directe et inverse ainsi que les C(V), et d'un banc de mesure en commutation.

## Fonctionnement du Laboratoire

Le Laboratoire Ampère étant sur 4 établissements (CNRS, ECL, INSA et UCB) et sur 4 bâtiments, il est nécessaire de favoriser la cohésion des personnels à travers un certain nombre de temps forts :

- L'Assemblée Générale de rentrée, en janvier, a pour objectif de présenter les résultats de l'année précédente, d'accueillir les nouveaux entrants, et de définir les priorités de l'année.
- La journée des projets, en juillet, permet de présenter à l'ensemble du Laboratoire chaque projet déposé, qu'il ait été retenu ou non pour financement, afin de donner une vue globale des recherches et des orientations scientifiques en cours.
- Les présentations des doctorants 1<sup>ère</sup> Année, en septembre, répond à un triple objectif : s'informer mutuellement sur les recherches faites à Ampère, détecter éventuellement des problèmes sur certaines thèses, aider si besoin les doctorants.
- La journée d'intégration des doctorants, qui a lieu traditionnellement à l'automne, est un lieu d'échange privilégié entre les doctorants des différents sites.
- Les séminaires communs des équipes « Actionneurs et systèmes » et « Commande » est un rendez-vous bi-mensuel autour d'une présentation d'un travail de recherche interne ou externe (chercheurs invités).
- Enfin, quelques réunions croisées entre équipes, appelées think tank, sont organisées régulièrement afin de faciliter le dialogue entre disciplines et de définir éventuellement des préoccupations scientifiques communes pouvant déboucher sur des projets aux interfaces.

## Ampère et son environnement

### Positionnement local, régional, national

Le Laboratoire Ampère est membre de l'Institut Carnot I@L, qui regroupe 11 laboratoires lyonnais du domaine de l'ingénierie (410 chercheurs eq TP, 552 doctorants, 43 500 k€ de budget consolidé, 17300 k€ de recettes partenariales). A ce titre, il a perçu directement pour les années 2007 et 2008 les sommes suivantes, qui ont permis d'investir en équipements pour différentes plate-formes du laboratoire (équipement de caractérisation des nouvelles huiles et des solides isolants pour transformateurs Haute Tension, équipement pour l'analyse de défauts structuraux présents ou qui apparaissent lors du test électrique des composants SiC d'électronique de puissance, équipement pour des tests de fiabilité des supercondensateurs en vue de l'hybridation de véhicules terrestres, équipement de caractérisation électromagnétique de matériaux magnétiques sous contraintes élevées, outil de prototypage DSPACE permettant de tester nos systèmes de commande et de supervision pour les systèmes embarqués) :

	2007	2008
Crédits abondables Carnot	592 k€	935 k€
Retour automatique laboratoire (50% abondement)	34 k€	53,7 k€

Au niveau régional, Ampère participe à 4 des 14 clusters de la région Rhône-Alpes : « Energies renouvelables, efficacité énergétique », « Informatique, signal, logiciels embarqués », « Transports, territoires et société », « Environnement ». Plusieurs projets dans le cadre de l'appel d'offre Emergence ont également été retenus.

	2007	2008	2009
Crédit régions	259 k€	283 k€	220 k€
Nombre d'allocations attribuées	2	1	2

A travers plusieurs projets labellisés, Ampère participe également à plusieurs pôles de compétitivité : Lyon Urban Trucks&Bus 2015, MOV'EO, ASTech, ViaMeca

Au niveau national, Le Laboratoire Ampère est un acteur à part entière du GDR SEEDS, *Systèmes d'Energie Electrique dans leur Dimension Sociétale*, qui fédère l'ensemble des laboratoires et équipes académiques de génie électrique en France. Deux pôles de ce GDR sont animés par des enseignants-chercheurs d'Ampère : ISP3D (B. Allard), Environnement-Santé (N. Burais puis F. Buret). Ampère est également membre du GDR MACS, *Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques*, avec E. Niel membre du Comité Directeur, T. Redarce responsable du GT SysMe

(Systèmes mécatroniques) et L. Pietrac co-animateur du GT INCOS (Ingénierie de la commande opérationnelle sure).

## Positionnement international

Au niveau international, le principal fait marquant du quadriennal 2007-2010 concerne la création au 1/7/2009 du Laboratoire International Associé franco-brésilien James Clerk Maxwell (LIA Maxwell), création pour laquelle le Laboratoire Ampère a joué un rôle moteur. Ce LIA regroupe 2 laboratoires français (G2ELab UMR5269 et Ampère UMR5005) et 3 équipes de recherche brésiliennes (des Universités Fédérales de Santa Catarina et de Minas Gerais, et de l'Ecole Polytechnique de l'Université de São Paulo). Le LIA résulte de liens étroits existant depuis 20 ans et exprimés à travers plus 50 publications communes en Revues Internationales et une quinzaine de thèses en partenariat. Les principaux thèmes de recherche abordés concernent en premier lieu 3 sujets relativement théoriques : les modèles numériques pour l'électromagnétisme, les méthodologies de conception et d'optimisation de dispositifs et systèmes lorsque leurs performances sont essentiellement liées à leur comportement électromagnétique, et la construction des modèles de matériaux complexes utilisés, adaptés à ces simulations numériques. Les domaines applicatifs relèvent du bio-électromagnétisme, de la Compatibilité Electromagnétique spécialement des systèmes embarqués, et des actionneurs non traditionnels.

Un autre fait marquant est la création du consortium international pour la métagénomique du sol (Terragenome, <http://www2.cnrs.fr/presse/journal/4389.htm>). Animé par les chercheurs d'Ampère, il vise à coordonner les efforts de recherche afin d'aboutir au séquençage génétique des microorganismes du sol. Un défi colossal, qui ouvre d'innombrables perspectives fondamentales et appliquées mais que seule une action internationale permettra de mener à bien. Un tel projet, totalement irréaliste il y a encore quelques années, devient en effet aujourd'hui possible grâce aux progrès récents de techniques de génomique microbienne environnementale, de séquençage, de robotique et de bioinformatique.

Le laboratoire Ampère est en outre membre du réseau européen du Fluid Power (FPCE), organisation rassemblant les principaux laboratoires ou institutions européens dans le domaine, ayant pour objectif la coordination des conférences et congrès scientifiques, la formation (masters, PhD et post-dosctorats), ainsi que la réponse coordonnée à des appels d'offre européens ou industriels.

Enfin le Laboratoire est visible au niveau international à travers plusieurs collaborations suivies (CNM Barcelone pour l'intégration de puissance, Université de Liège pour la modélisation, Université du Québec pour la Haute Tension, ...) et un nombre non négligeable de thèses en co-tutelles (9 thèses soutenues dans la période 2006-2009, 5 thèses en cours).

## Participation aux instances nationales ou internationales

A travers certains de ses membres, Ampère est très actif au niveau national :

- Laurent Krähenbühl est responsable français du LIA Maxwell,
- Hervé Morel est Directeur du GDR SEEDS,
- Alain Nicolas est Président de la section 63 du CNU,
- Laurent Nicolas est Président de la section 08 du Comité National,
- Pascal Simonet est membre de la Commission de Génie Génétique et du Comité d'experts Biotechnologies de l'AFSSA.

## Relations industrielles

Avec l'évolution des financements de la recherche, les relations d'Ampère avec le monde industriel sont de 2 sortes :

- Des contrats de recherche directs,
- Des contrats institutionnels (ANR, FCE) ou financés par des fondations privées (FRAE) auxquels les industriels participent de façon active.

	2006	2007	2008	2009	Moyenne annuelle 2006-2009
Contrats directs avec industrie	334	529	847	486	549
Autres contrats impliquant des industriels	301	269	837	949	589
Total	635	798	1684	1435	1138
Part du budget en relation avec des industriels	34%	34%	44%	31%	36%

A noter également lors du quadriennal 2007-2010 la création de 2 start-up :

- ENESIO (C. Vollaire), pour des applications technologiques liées à la transmission d'énergie sans fil.
- ENOVEO (T. Vogel), pour la recherche, le conseil et l'expertise dans le domaine de la bio-ingénierie environnementale.

Une 3<sup>ème</sup> start-up (H. Cérémonie) est en incubation au sein de CREALYS, pépinière d'entreprise des établissements lyonnais ; elle est basée sur un procédé nématocide par injection de courant.

### **Lien avec la formation**

Le laboratoire Ampère regroupe toutes les spécificités du génie électrique sur la place lyonnaise : ses enseignants-chercheurs assurent la plupart des enseignements de la spécialité dans les différents établissements de Lyon. Ampère est également le laboratoire d'accueil principal du Master GEGP, dispensant les enseignements de cette formation que ce soit pour le parcours recherche ou le parcours professionnel, notamment pour les filières GE (Génie électrique) et GSA (génie des systèmes automatisés). Les enseignants-chercheurs d'Ampère participent aussi aux formations initiales de l'ECL, l'INSA (Départements GE, GEN, GMC) et de l'UCBL, aux formations continues (ITII et CNAM), ainsi qu'à la formation d'ingénieurs de l'Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique (CPE) de Lyon. Le laboratoire intervient également dans le master international « IMESI » (International Master in Embedded Systems & Medical Image Engineering) ouvert à l'INSA de Lyon. On peut noter aussi une participation active aux tutoriales de l'Ecole Doctorale EEA. Enfin Ampère accueille chaque année des collégiens et lycéens pour des journées découvertes ou des stages de courtes durées.

Au niveau international, le laboratoire participe à la formation par la recherche de formateurs étrangers (Algérie, Cameroun, Syrie, Tchad ...) avec le soutien du ministère des affaires étrangères ; plusieurs thèses ont été soutenues dans ce cadre.

## Données synthétiques et principaux indicateurs

### Personnels

#### Evolution du personnel sur le quadriennal

	Rappel 1/1/2003	1/1/2006				1/1/2007	1/1/2008	1/1/2009
	CEGELY	Total	CEGELY	LAI	GME	Total	Total	Total
<b>Ens.-chercheurs</b>	<b>29</b>	<b>45</b>	<b>32</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>47</b>	<b>50</b>
PU		15	10	4	1	15	17	16
MCF		30	22	8		30	30	34
<b>Chercheurs CNRS</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>			<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
DR CNRS		4	3		1	4	4	4
CR CNRS		2	2			3	5	5
<b>ITA</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>2</b>		<b>15</b>	<b>16</b>	<b>19</b>
IATOS	8	11	9	2		11	11	11
ITA CNRS	2	4	4	0		4	5	8
<b>Autres EPST</b>		<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Total Permanents</b>	<b>43</b>	<b>67</b>	<b>50</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>68</b>	<b>73</b>	<b>79</b>
Doctorants	33	64	52	12		64	70	80
Post-doc, CDD	5	13	8	2	3	12	13	12
Autres		2	1	1		2	3	2
<b>Total non permanents</b>	<b>38</b>	<b>79</b>	<b>61</b>	<b>15</b>	<b>3</b>	<b>78</b>	<b>86</b>	<b>94</b>
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>146</b>	<b>111</b>	<b>29</b>	<b>6</b>	<b>145</b>	<b>159</b>	<b>173</b>

La Laboratoire Ampère connaît une véritable croissance du nombre de personnels, avec une augmentation de 18% depuis 2006. Cette croissance est continue depuis la création du CEGELY, et s'explique par la fusion dont est issu Ampère mais aussi par une croissance naturelle des effectifs.

#### Répartition du personnel par équipe au 1/1/2009

	PAF*	POST*	Commande	EASY	EPI	Matériaux	Microsystèmes et microbiologie	Modélisation	Autre	Total
<b>Ens.-chercheurs</b>			<b>9</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>50</b>
PU			3	4	4	1	2	2		16
MCF			6	9	7	5	2	3	2	34
<b>Chercheurs CNRS</b>			<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>9</b>
DR CNRS					1		1	2		4
CR CNRS					2		1	2		5
<b>ITA</b>	<b>6</b>	<b>8</b>					<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>19</b>
IATOS	4	6					1			11
ITA CNRS	2	2					2	1	1	8
Autres EPST							1			1
<b>Total Permanents</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>79</b>
Dont HDR			3	7	7	1	3	5	1	27
Dont PEDR			4	5	6	1	2	3	1	22
Doctorants			11,5	18	27	9	8	6,5		80
Post-doc, CDD			1	1	2		7	1		12
Autres			0,5	0,5					1	2
<b>Total non permanents</b>			<b>13</b>	<b>19,5</b>	<b>29</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>7,5</b>	<b>1</b>	<b>94</b>
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>22</b>	<b>32,5</b>	<b>43</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>17,5</b>	<b>4</b>	<b>173</b>

PAF : Pôle Administratif et Financier

POST : Pôle Scientifique et Technique

### Répartition du personnel par site au 1/1/2009

	ECL	INSA	UCBL	Total
Ens.-chercheurs	13	25	12	50
Chercheurs CNRS	5	3	1	9
Autres EPST	1			1
IATOS	4	5	2	11
ITA CNRS	6	1	1	8
<b>Total Permanents</b>	<b>29</b>	<b>34</b>	<b>16</b>	<b>79</b>
Doctorants	23	45	12	80
Post-doc, CDD	8	3	1	12
Autres	1	1		2
<b>Total non permanents</b>	<b>32</b>	<b>49</b>	<b>13</b>	<b>94</b>
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>83</b>	<b>29</b>	<b>173</b>

### Nombre de doctorants par équipe (1/1/2009)

	Commande	EASY	EPI	Matériaux	Microsystèmes	Modélisation	Total
Commande	8	5	2	0	0	0	11,5
EASY		14	2	0	0	1	18
EPI			24	1	0	1	27
Matériaux				7	0	3	9
Microsystèmes					8	0	8
Modélisation						4	6,5
<b>Total</b>							<b>80</b>

### Origine des doctorants (1/1/2009)

Algérie	3	Madagascar	1
Cameroun	1	Mali	2
Chine	8	Maroc	3
Colombie	1	Mexique	1
Côte d'Ivoire	1	Syrie	5
France	28	Tunisie	11
Hongrie	1	Ukraine	1
Ile Maurice	1	Venezuela	1
Iran	1	Vietnam	6
Liban	4	<b>Total</b>	<b>80</b>

### Durée des thèses (soutenances entre 2005-2008)

Durée en mois	Nb	Durée en mois	nb
26	1	43	3
32	5	44	1
34	3	45	5
36	6	47	1
37	9	48	5
38	11	49	1
40	1	54	1
41	2	66	1
		<b>Moyenne</b>	<b>39.8</b>

### Financement des doctorants (1/1/2009)

Allocation de recherche du ministère	9	Bourse prélevée sur contrat industriel	3
Bourse attribuée par un gouvernement étranger ou le M.A.E.	24	CDD	6
Bourse attribuée par un ministère (hors allocataire de recherche)	2	CDD BDI-PED	1
Bourse attribuée par un organisme (INSERM, CEA, INRA, DRET, ...)	4	CDD DGA	1
Bourse attribuée par une collectivité territoriale	8	CIFRE	18
Bourse attribuée par une fondation, association ou institution privée	2		
Bourse prélevée sur un contrat de recherche européen	2	<b>Total</b>	<b>80</b>

## Production scientifique

### Evolution globale des publications sur le quadriennal

	2006				2007	2008	2009	Total 2006-2009	Moyenne annuelle 2006-2009
	Total	CEGELY	LAI	GME	Total	Total	Total		
ACL	57	39	11	7	49	72	38	216	54
ACT	93	56	26	11	80	116	43	332	83
INV	5	1	0	4	0	2	1	8	2
Autres	38	24	5	9	19	17	32	106	26
Brevets	3	3	0	0	1	2	2	8	2
TH	16				15	16	5	52	16

Données consuslatbles sur HAL (<http://www.ampere-lab.fr/spip.php?rubrique4>)

### Publications par équipes sur le quadriennal (2006-2007-2008-2009)

	Commande	EASY	EPI	Matériaux	Microsystèmes	Modélisation
ACL	36	36	47	27	94	40
ACT	85	88	65	45	11	65
INV	0	0	0	0	2	2
Autres	7	15	8	13	30	24
Brevets	0	0	1	3	1	2
TH	4	6	17	7	10	7

## Informations financières

### Evolution des crédits et de leur répartition financière (non consolidé, en k€)

	2006				2007	2008	2009	Moyenne annuelle 2006-2008
	Total	CEGELY	LAI	GME	Total	Total	Total	
Dotation ministère	130	95	35	0	146	146	146	141
Dotation CNRS	76	76	0	0	74	75	75	75
Intervention CNRS	75				51	21	21	49
ANR	318	196	34	88	663	1123	724	701
Région	293	74	12	207	259	196	153	249
Europe	124	94	0	30	129	258	162	170
Institutionnel autre	518	353	0	165	487	1152	2793	719
Industriel	334	213	121	0	529	847	480	570
<b>Total</b>	<b>1868</b>				<b>2338</b>	<b>3818</b>	<b>4554</b>	<b>2675</b>

### Crédits des équipes (moyenne annuelle sur 2007-2009, non consolidé, en k€)

	Commande	EASY	EPI	Matériaux	Microbiologie et microsys.	Modélisation	Moyenne 2007-2008
Contrats industriels	101	76	116	60	34	226	612
Contrats institutionnels	54	212	651	21	565	141	1645
ANR	113	11	120	9	533	50	836
Europe	0	15	0	0	168	3	186
<b>Total</b>	<b>269</b>	<b>315</b>	<b>536</b>	<b>90</b>	<b>1299</b>	<b>420</b>	<b>2788</b>

### Budget consolidé recherche (en k€)

	2006	2007	2008	2009	Moyenne annuelle 2006-2009	
CNRS		818	863	972	885	11%
Ministère		2093	2154	2235	2260	28%
Autre		3195	4981	6016	4730	61%
<b>Total</b>		<b>6105</b>	<b>7998</b>	<b>9223</b>	<b>7775</b>	



### **Gestion des crédits (en k€)**

	2006	2007	2008	2009	Moyenne annuelle 2006-2009	
CNRS	604	838	943	1466	963	33%
ECL	410	527	954	2139	1008	34%
INSA	353	723	893	513	621	21%
UCBL	434	242	234	435	336	11%

### **Secteurs d'activité**

	2006	2007	2008	2009	Moyenne annuelle 2006-2009	
Energie	283	319	1116	1182	725	28%
Transports	449	700	406	140	424	16%
Vivant/environnement	781	842	1283	2126	1258	48%
Autre	133	140	163	318	189	7%

### **Dépenses : moyenne annuelle sur 2006-2009 des dépenses annuelles**

	Investissement	Fonctionnement	Infrastructure	Salaires	Reports
Moyenne annuelle	19 %	41 %	1 %	30 %	16%

## **Auto-analyse du Laboratoire Ampère**

Cette analyse sera reprise plus en détail dans le projet scientifique 2011-2014.

### **Ponts forts**

- Pluri- et interdisciplinarité avérée
- Occupe une place unique (pour le moment) dans le paysage GE et peut être du CNRS. Pas réellement de concurrence universitaire. Laboratoire lisible, développant des thématiques bien identifiées et originales par rapport aux autres labos de GE
- Des recherches originales et médiatiques à l'interface électromagnétisme – environnement : piles à combustibles microbiennes, bioremédiation des sols par injection de courant
- Une forte dynamique
- Regroupe presque tout le potentiel lyonnais en Génie Electrique de Lyon
- Spectre scientifique large, ce qui permet une mobilisation rapide des recherches prioritaires
- Des axes scientifiques reconnus : modélisation, intégration de puissance en SiC, Haute tension, Fluid Power, transferts de gènes et adaptation bactérienne
- Deux thématiques à fort enjeu sociétal et qui révolutionneront notre société dans les années à venir : la bioingénierie et l'intégration de puissance

### **Points faibles**

- Une forte dynamique, impliquant une gouvernance et une structuration pas forcément adaptée à la nouvelle taille
- Effectif limité compte tenu de l'étendue des activités : certaines équipes ont une taille sous-critique (haute tension par exemple)
- Localisation sur 2 lieux géographiques (ECL, Doua), 4 établissements, 4 bâtiments : manque d'identité de laboratoire
- Manque de synergie naturelle entre et au sein des équipes éclatées dans des bâtiments différents
- Petit sur UCBL et, dans une moindre mesure, sur ECL, ce qui pose le problème de la taille par rapport à l'établissement
- Conflit d'intérêt entre la politique des établissements de tutelle et la politique du laboratoire. Ainsi, l'ECL a mis 4 années à commencer à s'approprier la bioingénierie présente à Ampère sur le site ECL, ce qui implique qu'il n'y a pas eu de postes d'enseignants-chercheurs dans ce domaine, alors que l'activité est en plein essor.
- Ressources contractuelles directes avec les industriels faibles : 21% en 2006-2008.

- Image générale du Génie Electrique et de l'Automatique, en particulier vis-à-vis des étudiants. Difficulté de recrutements à tous les niveaux (M2R, Doctorants, post-doc) – pas de filière étrangère, pas d'école spécialisée. Ampère n'est pas attractif pour les jeunes ingénieurs – spécialement à l'ECL où il y a un découplage de fait entre enseignement et recherche.
- Automatique (notamment les aspects amonts) peu visible, à Ampère et sur Lyon
- Une lisibilité des recherches menées, notamment disciplinaires quelques fois difficile à trouver
- Indices bibliométriques (publications dans des revues, facteur h), qui sont fortement liés aux secteurs disciplinaires, et faibles pour le GE et l'Automatique.

### **Opportunités**

- Opportunité pour réunir les forces de la Doua sur un seul bâtiment dans le quartier Ingénierie. Possibilité d'une proximité forte avec le CETHIL
- Démarche système : être capable de traiter presque tous les aspects d'un projet industriel

### **Risques**

- Risques liés à l'évolution du paysage de la recherche: plus de 90% des financements sont obtenus sur projets, avec des crédits fléchés, ...
- La lisibilité du Laboratoire peut rapidement être remise en cause par un changement de vision des tutelles (le CNRS en particulier)
- Risque de crise ou de repli identitaire, pouvant aller jusqu'à éclatement lié à des personnes – la cohésion semble être plutôt une nécessité imposée par l'appartenance au CNRS qu'une véritable volonté de travailler ensemble
- Risque d'éparpillement lié au spectre large des recherches

# ***Bilan des activités des équipes***

---

***Equipe Actionneurs et systèmes***

***Equipe Commande***

***Equipe Electronique de puissance***

***Equipe Matériaux***

***Equipe Microsystèmes et microbiologie***

***Equipe Modélisation***

## Equipe Actionneurs et Systèmes

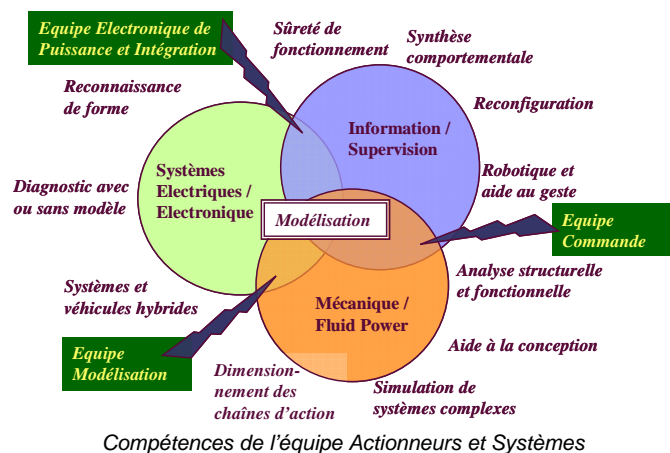
Effectifs au 1<sup>er</sup> janvier 2009 : 32,5 personnes

- 13 permanents : 4 PU, 9 MCF
- 18 doctorants, 1 post-doc, 0,5 IR fonds propres

Mots-clefs : Modélisation systèmes, synthèse d'architecture et dimensionnement des systèmes, analyse structurelle, diagnostic, sûreté de fonctionnement, systèmes réactifs.

Lors de la création du Laboratoire Ampère, l'équipe Actionneurs et Systèmes (EASy) a été structurée autour de compétences issues de 3 équipes du CEGELY et du LAI : Sûreté de fonctionnement et conception des entraînements électriques du CEGELY, Supervision, sûreté et synthèse des systèmes à événements discrets (3SP) du LAI, et Modélisation et prototypage virtuel des systèmes mécatroniques (FTR) du LAI.

Outre ces compétences scientifiques, la fusion entre le CEGELY et le LAI a permis de regrouper dans cette équipe de larges compétences technologiques concernant la transmission de puissance, le stockage de l'énergie, la mise en œuvre, l'architecture matérielle et de commande, que le medium soit électrique, mécanique, thermique, fluide ou gazeux.



Le spectre relativement étendu de ces compétences permet donc d'aborder d'une manière globale le problème de la conception des systèmes multi-domaines en visant une exploitation efficace de l'énergie, et de développer des méthodes, des outils et des idées innovantes en maîtrisant les échelles spatiales, temporelles, fréquentielles et événementielles.

### Objectifs scientifiques

Pour le quadriennal 2007-2010, l'équipe s'est fixée comme objectif de croiser des recherches à caractères méthodologiques et appliqués, originellement dédiées à différents technologies ou échelles, afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la conception des systèmes. Il s'agit de développer des méthodologies et les outils associés pour la conception, la spécification et l'analyse des performances de systèmes multi-domaines en relation avec leur environnement.

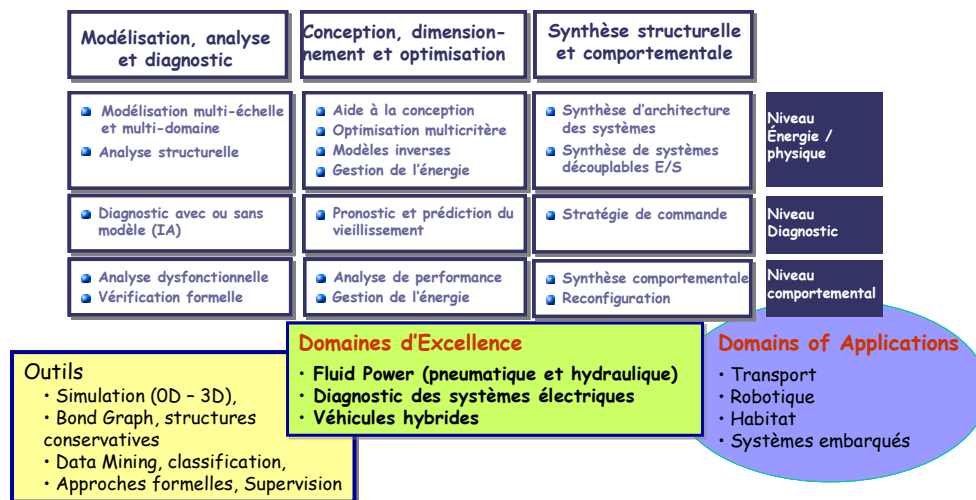
### Contexte des recherches

De façon très générale, l'ingénierie des systèmes constitue le contexte scientifique des travaux de recherche développés au sein de l'équipe. La levée des verrous scientifiques liés aux approches «système» en conception constitue un enjeu économique important en raison des contraintes énergétiques, de la course à la miniaturisation, du développement durable, de l'accroissement des fonctionnalités... La conception nécessite donc le développement de méthodologies originales à la frontière de la modélisation, de la commande, et des réalisations technologiques.

De manière générale, notre approche de ces problématiques scientifiques repose sur une forte interaction entre la connaissance des caractéristiques des technologies, des composants et des architectures d'une part, et de l'expression des fonctionnalités fixées par un cahier des charges d'autre part. L'analyse des spécifications dont la définition découle le plus souvent de mesures de références telles que des indicateurs, des notations, des performances dynamiques et énergétiques... constitue la base des choix technologiques, du dimensionnement et des stratégies de commande dont

l'optimisation permet finalement de trouver la meilleure adéquation au cahier des charges. L'ensemble de cette démarche constitue notre approche commune de la conception des systèmes.

En s'efforçant d'aborder le problème avec une approche intégrée et unifiée, les méthodes, modèles et outils développés doivent donc s'adresser spécifiquement aux démarches d'analyse et de diagnostic, de synthèse structurelle et comportementale, et de dimensionnement et d'optimisation.



Axes de recherche de l'équipe Actionneurs et Systèmes

- **Axe analyse et diagnostic:** des différents niveaux de représentation de la connaissance (modèle de représentation ou de connaissance), il est nécessaire d'extraire et d'exploiter des propriétés aussi bien structurelles qu'analytiques permettant de définir des mesures sous la forme d'observateurs, de fonctions de diagnostic, et d'indicateurs de performances ou de défaillance. De ces mesures vont résulter les spécifications tant en termes d'architecture que de dimension et de paramétrage des constituants du système.
- **Axe dimensionnement et optimisation:** on entend par prototypage virtuel la phase qui consiste à paramétrer au mieux les différents constituants ou lois de commande d'un système afin de limiter le nombre de prototypes physiques. De l'adéquation entre l'architecture, les modèles et les spécifications, résulte la pertinence des solutions optimales ou sous-optimales déterminées. La recherche de cette cohérence est d'autant plus intéressante que la complexité d'un problème multi-critères généralement sous contraintes tend à augmenter considérablement le coût des procédures d'optimisation.
- **Axe synthèse structurelle et comportementale:** en tenant compte des degrés de liberté énergétiques et fonctionnels à piloter, de la sûreté, mais également des incertitudes et du caractère hétérogène des systèmes, l'étude de l'adéquation d'une architecture à un cahier des charges constitue une problématique pour laquelle peu de méthodologies fournissent une réponse globale en phase de conception. La synthèse des architectures de transmission de puissance et de l'information répondant à ces objectifs multi-critères doit se baser sur la définition d'une part de conditions structurelles nécessaires, et d'autre part d'outils d'aide à la spécification. De même, la synthèse de l'architecture des contrôleurs aboutit sur la base d'outils formels à la détermination de comportements respectant les spécifications du cahier des charges.

## Activité scientifique

Ces axes sont intégrés aux priorités scientifiques 1 (*Méthodes et outils génériques de modélisation*), 4 (*Systèmes mécatroniques et embarqués*) et 7 (*Systèmes à fluide sous pression et robotique médicale*) du laboratoire en collaboration avec les équipes Commande, Modélisation et EPI.

## Articulation par rapport aux fiches activités

A l'issue de ces 2 premières années, la fusion entre les compétences issues du CEGELY et du LAI s'est surtout matérialisée au travers de quelques projets phares dans le cadre du pôle de compétitivité LUTB'2015 ou lors de collaborations avec des industriels. Certaines activités antérieures à la fusion ont naturellement été poursuivies.

### Hybridation pour le transport

C'est dans ce domaine que l'équipe a trouvé tout naturellement un support pour rendre effective la fusion. En effet, la pénétration continue et croissante de l'énergie électrique, depuis les fonctions de contrôle jusqu'aux motorisations auxiliaires ou principales, s'accompagne de nouvelles problématiques liées à la conception. Pour l'instant, le tout électrique ne constitue pas toujours la meilleure solution. Combinée à une gestion intelligente de l'énergie, l'association de différentes technologies peut conduire à des gains de performance importants, en permettant d'exploiter au mieux les spécificités et les avantages de chacune d'elles.

En particulier, suite à un programme PREDIT avec PSA Peugeot Citroën, le projet Hybus (LUTB/FUI 2006-2010) avec IRISBUS et la collaboration avec Volvo Powertrain (CIFRE 2005-2008), ont permis d'acquérir une sérieuse expérience de l'hybridation des systèmes et de la gestion de l'énergie. L'équipe maîtrise aujourd'hui l'ensemble de la chaîne: du stockage de l'énergie à son exploitation en passant par sa transmission. Les travaux sur la modélisation multi-physique [Fiche-17], les systèmes passifs de stockage [Fiche-11] et sur le développement d'outil d'aide à la conception [Fiche-18] montrent la pertinence des résultats obtenus.

C'est un domaine phare de l'équipe dans lequel les résultats sont aussi bien théoriques, méthodologiques ou encore appliqués.

### Systèmes mécatroniques innovants

L'association de compétences dans le domaine du génie électrique et du fluid power constitue certainement une exception dans la communauté scientifique française. Ce couplage est une opportunité pour le développement de nouveaux dispositifs mécatroniques associant énergie électrique, énergie fluide et électronique de commande.

Tout d'abord, l'activité robotique médicale [Fiche-19] a mis à profit ce spectre large de compétences pour développer de nouveaux concepts d'aide au geste chirurgical (BirthSim, Haptique pneumatique, colloscope intelligent). Ces travaux se sont également appuyés sur des collaborations avec le milieu médical et des relations suivies avec d'autres laboratoires français et étrangers (Canada, Colombie) au travers de projets nationaux (projet SIMED-Cluster ISLE), européen, et de collaborations internationales (projet WARTHE, ECOS-Nord).

D'autre part, un travail original dont les principes ont été étudiés dans le cadre du projet CINEMAS2 (LUTB/FUI 2006-2010), débouche aujourd'hui sur une collaboration avec Plastic Omnium AE dont l'objet est l'exploitation de jets pulsés sur les haillons arrière afin d'améliorer le Cx d'un véhicule. On vise ici une optimisation simultanée des écoulements, des systèmes de génération des jets et de la commande [Fiche-17].

### Systèmes sûrs de fonctionnement

L'intégration de procédures de diagnostic et de prédiction de la défaillance au développement de démarches de conception de systèmes sûrs de fonctionnement est aujourd'hui un verrou scientifique ciblant bien les besoins industriels. Nos approches visent ici la conception de systèmes particulièrement innovants intégrant les spécificités des dysfonctionnements prévisionnels pour assurer une continuité de service avec le niveau de sûreté spécifié par le cahier des charges [Fiche-20]. Les capacités croissantes d'intégration au niveau de l'électroniques de commande (FPGA) ont encouragé ces développements et la demande en termes de fonctionnalités implantées (quantité et complexité) a elle aussi suivi cette tendance.

Dans cet esprit, une approche de diagnostic intelligent a été appliquée dans une collaboration avec Hispano-Suiza et est aujourd'hui étendue aux entraînements (réducteur mécanique) dans le cadre d'un projet du Carnot Ingénierie@Lyon. En parallèle, nous développons une approche originale qui consiste à associer des méthodes temps-fréquence avec des chaînes de Markov cachés [Fiche-20].

D'autre part, une assistance à la supervision d'équipements industriels est proposée dans une collaboration franco-vénézuélien (PCP'09 PDVSA-INSA). Cette investigation met en œuvre l'exploitation conjointe des fonctions de surveillance, de détection et de diagnostic aux fonctions de pilotage de la maintenance.

Dans le cadre de la conception sûre de fonctionnement, FerroCOTS [Fiche-20] est un projet devant permettre dans les années à venir de mettre en œuvre dans les trains des systèmes de contrôle-commande développés à l'aide de COTS (Component on the Shelf).. Dans ce contexte, nos investigations pour la conception sûre des systèmes embarqués, critiques d'un point de vue sécurité, nécessitent le développement d'outils spécifiques, permettant de maîtriser leur complexité fonctionnelle, et des lois de commandes discrètes sûres tolérantes aux fautes considérées comme événementielles.

### **Principaux faits marquants de l'équipe Actionneurs et systèmes**

- **Médaille "Joseph Bramah":** Médaille «Joseph Bramah» au Professeur Serge SCAVARDA, Professeur Émérite au Laboratoire Ampère, INSA de Lyon : chaque année, cette médaille récompense une personnalité dont les travaux ont contribué de façon significative à l'avancée des connaissances dans le domaine des sciences du Génie Mécanique et plus spécifiquement de l'hydraulique. Ce prix récompense l'ensemble des travaux effectués par Serge Scavarda dans le domaine du Fluid Power.
- **1<sup>er</sup> véhicule industriel hybride européen:** en collaboration avec Volvo Powertrain, sur la thématique de l'hybridation thermique-électrique des véhicules industriels ou urbain, le laboratoire Ampère a participé au développement d'une plateforme de simulation HIL (Hardware In the Loop) permettant de vérifier les calculateurs embarqués afin d'en assurer une qualité mesurable.
- **Simulateur d'accouchement (BirthSIM):** ce simulateur a été réalisé en collaboration avec le Dr O. Dupuis, obstétricien à l'hôpital Lyon Sud, pour former les internes à l'utilisation de forceps obstétriques. Un prototype, actuellement utilisé aux Hospices Civils de Lyon, a été récompensé en 2007 par le 1<sup>er</sup> prix dans la catégorie « Science de la Vie et de la Santé » lors des 15<sup>èmes</sup> Carrefours de la Fondation Rhône-Alpes Futur.

### **Plateformes, moyens expérimentaux**

Au sein de l'équipe, nous essayons de développer la continuité entre théorie et expérimentation en passant par les aspects logiciels et les applications, ainsi nous nous appuyons sur les moyens expérimentaux du Centre d'essai Fluid Power (voir équipe *Commande*), et de la Plateforme diagnostic.

### **Positionnement, collaborations et partenariats**

Outre les collaborations ponctuelles avec d'autres laboratoires du site de Lyon, français ou étranger, l'équipe entretient des relations avec plusieurs industriels comme PSA Peugeot Citroën, Hispano-Suiza, le CETIM Senlis, ... pour les aspects applicatifs et ses membres se trouvent associés des organisations scientifiques au niveau national et international.

- **Au niveau national,** de par ses domaines de compétence et ses objectifs scientifiques, l'équipe participe à l'animation scientifique au sein de 3 GDR : le GDR SEEDS (Système d'Energie Electrique dans leur Dimensions Sociétales), le GDR MACS (Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques) et le GDR STIC-Santé.  
Cette participation est particulièrement active au sein du GDR MACS, E. Niel étant membre du comité de direction du GDR et correspondant de l'action interGdR AFSEC (Approches Formelles pour les Systèmes Embarqués Communicants), L. Piétrac co-anime le groupe de travail INCOS (Ingénierie de la commande opérationnelle sûre) et T. Redarce anime le groupe SYSME (SYStème MEcatronique). L'équipe participe aussi au GT EDP.  
Enfin, au niveau du GDR STIC-Santé, T. Redarce est membre du comité scientifique et anime le thème F (Apprentissage et assistance aux gestes médicaux et chirurgicaux).
- **Au niveau international,** le groupe Sûreté de fonctionnement participe au Committee TC 1.3 on Discrete Event and Hybrid Systems de l'IFAC. A ce titre, plusieurs sessions de congrès ont été organisées (WIFAC 2005, MSR'07, DCDS 2009).  
Dans le contexte de l'activité scientifique Fluid Power (activité commune avec l'équipe commande), le laboratoire est membre fondateur du réseau européen Fluid Power Centres in Europe (FPCE), de l'International Board des principales conférences du domaine (PTMC-UK, SCIFP-Suède et Finlande, ICFP-Chine, JFPS-Japon, IFK-Allemagne), et a participé à des comités d'évaluation en Finlande. A noter que l'équipe a été invitée à présenter son activité dans un article spécifique de l'Int. Jour. of Fluid Power (IJFP). Elle participe aussi à l'International Standart Organisation (ISO) en tant qu'expert de la délégation française.
- L'originalité des travaux de l'équipe dans le cadre du langage Bond Graph et de l'inversion des modèles dynamiques pour la conception a également une reconnaissance internationale.

### **Pertinence et originalité de l'équipe**

L'équipe se caractérise par un domaine de compétence très original dans le paysage français de la recherche du fait:



- de son spectre scientifique large et multi-domaines : génie électrique, mécanique, mécanique des fluides, transfert thermique, thermodynamique, automatique des systèmes continus et à événements discrets,
- de ses compétences technologiques très variées, qui passent par la maîtrise de toute la chaîne de transmission de puissance : électrique, hydraulique, pneumatique, mécanique, thermique,
- de ses thématiques de recherche, pour certaines très originales, s'appuyant sur une continuité entre théorie et expérimentation et passant par les aspects logiciels et les applications.

## **Autoévaluation**

La diversité des compétences de l'équipe constitue aussi son talon d'Achille, en particulier en ce qui concerne l'émergence d'une identité spécifique. Il est nécessaire de faire émerger des projets communs permettant de rassembler et de mettre en évidence cette force. A la création du laboratoire Ampère, cet enjeu était d'autant plus difficile que chacun des groupes était déjà reconnu scientifiquement et actif dans sa propre communauté.

### **Les forces de l'équipe**

L'équipe se caractérise par un domaine de compétence très original dans le paysage français. En outre, l'équipe présente une ouverture scientifique intéressante de par :

- ses interactions avec les autres équipes du laboratoire, en particulier avec les équipes "Commande", "Modélisation" et "Electronique de puissance et Intégration".
- ses interactions importantes avec des laboratoires associées à d'autres disciplines du ST2I sur Lyon ainsi qu'en France et à l'étranger.
- un important travail de communication interne afin de favoriser le dialogue entre les différentes sensibilités. Ceci se concrétise par des séminaires bimensuels (organisés conjointement avec l'équipe Commande) et une journée des doctorants en 2007.

### **Les faiblesses de l'équipe**

Malgré ces aspects positifs, le spectre trop large n'a pas conduit à une fusion parfaite et 2 groupes distincts ont émergés malgré les tentatives de rapprochement, le premier s'intéressant au niveau physique du système et le second au niveau diagnostic/pronostic et comportemental du système.

On peut également regretter dans certains contextes :

- un manque de lisibilité par rapport à l'équipe commande qui fait le lien entre les propriétés physiques des systèmes et la sûreté de fonctionnement,
- une forte disparité dans l'activité recherche des membres de l'équipe, en partie due aux responsabilités administratives prises dans les établissements d'enseignement.

### **Opportunités**

- pour les recherches liées à la sûreté de fonctionnement, développement des collaborations avec l'industrie et de démonstrateurs afin d'illustrer les résultats des travaux.

### **Risques**

- Risque d'éparpillement lié au spectre large des recherches.

## **Message du responsable d'équipe**

Malgré les conditions initiales qui n'étaient pas nécessairement favorables à un rapprochement des membres de l'équipe, au cours de ces 2 années nous avons pu en interne établir des liens très forts dans certains domaines comme l'hybridation dans le transport et la modélisation d'une part et la sûreté de fonctionnement d'autre part. Ceci ne s'est pas fait au détriment des activités scientifiques qui étaient déjà reconnues. En 2007 et 2008, le recrutement de 2 maîtres de conférence de 61<sup>ème</sup> section a permis de renforcer la dimension théorique des travaux de l'équipe au niveau de la modélisation et de l'analyse structurelle des systèmes.

Les objectifs fixés pour ce quadriennal semblent en bonne voie d'être réalisés et les perspectives restent très encourageantes puisque l'équipe a récemment intégré plusieurs projets concernant les approches inverses pour l'aide à la conception (1 projet européen), le diagnostic dans le cadre du regroupement d'industriels SPEC et d'un projet Franco-Vénézuélien. En outre l'intégration de la dimension "système" dans la démarche scientifique des différentes équipes du laboratoire montre la réussite de la fusion de 2007. Elle se traduit, en dehors du lien naturel avec l'équipe "Commande", par des collaborations aujourd'hui fortes avec l'équipe "Modélisation" pour les travaux de recherche dans



le domaine de la modélisation multi-échelle et de l'aide au dimensionnement, et avec l'équipe "Electronique de Puissance et Intégration" en ce qui concerne le diagnostic et la sûreté de fonctionnement.

Ainsi, il serait tout à fait envisageable pour le prochain quadriennal, d'acter le découpage des thématiques de l'équipe et donc de répartir les membres de l'équipe d'une part dans une équipe se focalisant sur les problèmes de diagnostic et de sûreté de fonctionnement en lien avec l'intégration (de puissance et de commande), d'autre part dans une équipe liée à la conception des systèmes partiellement issue de l'actuelle équipe *Modélisation*.



## Equipe Commande

Effectifs au 1<sup>er</sup> janvier 2009 : 21 personnes

- 9 permanents : 3 PU, 6 MCF
- 11,5 doctorants, 1 post-doc, 0,5 IR fonds propres
- 5 étudiants de Master GEGP (filière Génie des Systèmes Automatisés)

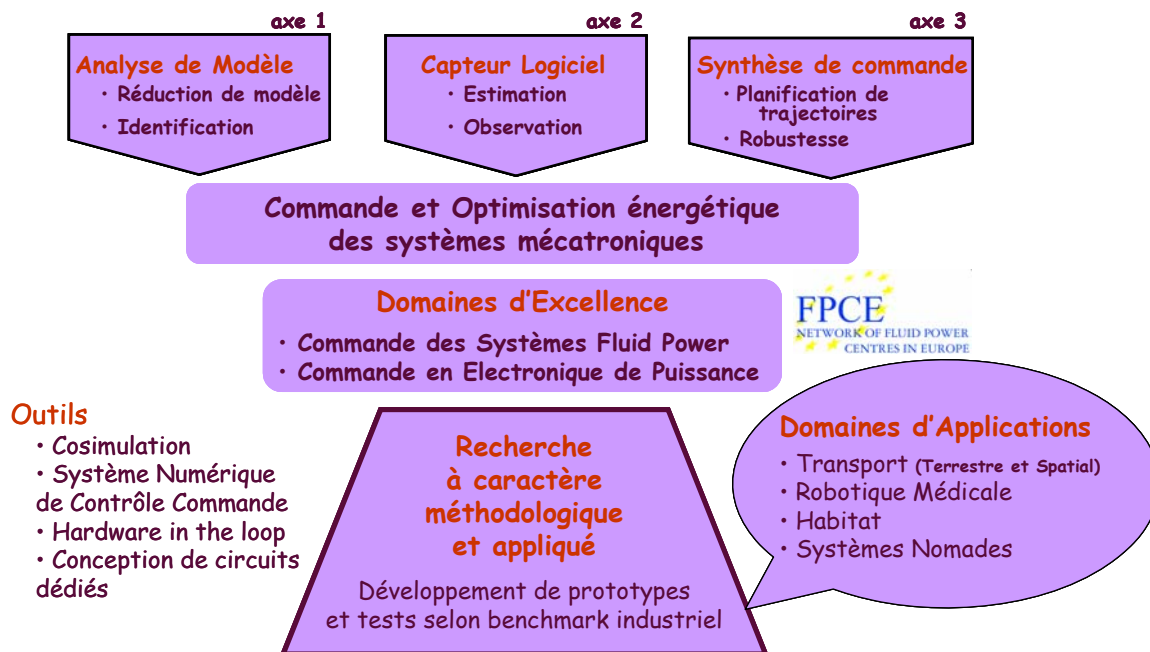
Mots-clefs : Automatique, méthodologie et applications, réduction de modèles, analyse de modèles, identification, capteur logiciel, planification de trajectoire, commande linéaire et non linéaire, robustesse, systèmes mécatroniques, systèmes Fluid Power, électronique de puissance.

L'équipe est issue de la fusion au 1er janvier 2007 d'une partie de l'équipe Fluid Power Transport et Robotique du Laboratoire d'Automatique Industrielle – LAI – et d'une partie du thème Sécurité de fonctionnement du Centre de Génie Electrique de Lyon – CEGELY

### Objectifs et contexte scientifiques

L'équipe Commande a pour objectif l'adaptation et l'application des techniques modernes de l'Automatique en termes de commande, identification, estimation, observation, filtrage et optimisation sur des procédés physiques en particulier sur des systèmes mécatroniques.

Elle étudie la Commande et l'Optimisation énergétique des systèmes mécatroniques. Elle est organisée en trois axes scientifiques (Axe 1 : Analyse de modèle, Axe 2 : Capteur logiciel, Axe 3 : Synthèse de commande) à vocation plutôt méthodologique et ayant pour objectif la mise en œuvre sur prototypes ou démonstrateurs des techniques modernes de l'Automatique.



Présentation des activités scientifiques de l'équipe Commande

L'originalité de l'équipe concerne son **positionnement à l'interface entre la théorie et la pratique et sa volonté de développer des bancs d'essais représentant une étape primordiale permettant le transfert industriel des techniques modernes de l'Automatique**. Pour des raisons historiques, deux domaines d'excellence sont reconnus à l'équipe : la Commande en Fluid Power (électropneumatique et électrohydraulique) et la Commande en Electronique de Puissance (électrique et électrotechnique). Le laboratoire Ampère est le seul laboratoire français appartenant au réseau Européen FPCE Fluid Power Centres in Europe (<http://www.fpce.net/>). Ces compétences sont au service des quatre domaines d'applications en émergence ou en essor au sein de l'équipe : Transport (terrestre et spatial), Robotique Médicale, Habitat, Systèmes Nomades.

L'équipe doit se développer en maintenant l'équilibre entre les aspects méthodologiques et appliqués. Le développement de nouveaux outils et/ou de nouveaux bancs d'essais sont motivés par la mise en

œuvre et l'adaptation de théories nouvelles issues de la communauté automatique nationale ou internationale et/ou de l'un des trois axes scientifiques de l'équipe, avec en priorité le maintien de sa position de leader international et national dans les deux domaines d'excellence précités.

La priorité de l'équipe au sein de la communauté automatique concerne sa volonté de mettre au point des méthodologies pour l'analyse, l'identification, l'estimation, l'observation et la commande des systèmes mécatroniques. Pour ce faire l'équipe Commande s'appuie sur quatre outils lui permettant de couvrir une grande partie du traditionnel cycle en V suivi lors du développement d'un nouveau produit. Il est devenu incontournable aujourd'hui pour un automaticien d'être présent lors de l'analyse des besoins afin d'intégrer les problèmes de commande dans la définition des spécifications utiles aux différentes phases de conception. Le codage des algorithmes de commande et/ou des algorithmes des capteurs logiciels doit être effectué par la suite pour des tests en simulation (cosimulation), sur des systèmes de prototypage rapide (système numérique de contrôle commande), sur contrôleur industriel pour une utilisation en bureau d'étude (hardware in the loop) ou pour une utilisation sur le système final (conception de circuit dédié).

- La cosimulation permet dans un premier temps de tester les algorithmes (capteurs logiciels et lois de commandes développées dans les axes 2 et 3 à partir d'analyse de modèle effectuée dans l'axe 1) sur des modèles de connaissance développés par l'équipe Actionneurs et Systèmes.
- Les systèmes numériques de contrôle commande permettent de tester les algorithmes sur des bancs d'essais pilotés par des cartes de prototypage dédiées à la recherche et au développement (type système dSpace).
- Le hardware in the loop est utile pour tester les algorithmes implémentés sur des composants industriels (type ECU pour le transport – partie Hardware) en pilotant un système entièrement simulé par un logiciel (partie Software).
- La conception de circuits dédiés permet le transfert des algorithmes sur composant faible coût, type ASIC, FPGA ou microcontrôleur.

## Activité scientifique

### Articulation par rapport aux fiches activités

Les activités de l'équipe Commande sont sensiblement équi-réparties en terme d'implication de son personnel sur les cinq fiches scientifiques détaillées dans ce rapport : 12-Commande et Gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée, 14-Estimation paramétrique et capteurs logiciels, 16-Commande des systèmes fluidpower, 18-Outils et méthodes pour l'analyse structurelle, le dimensionnement et la robustesse des systèmes, 19-Simulateurs et robots pour l'apprentissage et l'aide au geste médical. De plus il est apparu lors de ce quadriennal un axe en émergence : 13-Vers une meilleure gestion d'énergie dans l'habitat

Les travaux de l'équipe Commande lors de ce quadriennal ont été marqués par les points suivants.

- L'élaboration et la mise en œuvre d'algorithmes de commande pour améliorer les performances d'un système à forte intégration en considérant les différentes contraintes (précision et temps de calcul limités, surface de substrat réduite, faible consommation...) liées au caractère d'intégration (collaboration avec l'Université de Shanghai) – activité 12
- Dans le cadre de la réduction des consommations énergétiques des bâtiments, il a été montré que l'utilisation de modèle explicite de type boîte grise permettait non seulement un dimensionnement plus pertinent des sources [hal-00368363] mais également une meilleure maîtrise des ambiances et donc une amélioration du confort des occupants [hal-00374677]. Avec nos partenaires institutionnels (CETHIL, CSTB) et privés (EDF, POWEO), cette thématique se développe au laboratoire dans le cadre de projets régionaux et nationaux [Projet IRH, Cluster 7 – Energie, Région Rhône-Alpes, Intelligence Répartie pour la maîtrise des flux énergétiques dans l'Habitat, Juin 2005-Juin 2009] [Projet MIGRER, pôle de compétitivité TENERDIS] – activité 13.
- Le développement de méthodes générales de conception d'observateurs robustes, c'est-à-dire prenant explicitement en compte des écarts faibles (désensibilisation) ou important (robustesse) entre le modèle et le système observé. Collaborations avec l'équipe EMMAH, INRA et l'équipe DCSC de l'Université de Delft, Pays-Bas -[hal-00358890], [hal-00347166], [hal-00374670] – activité 14
- Des travaux sur le développement et l'adaptation d'algorithmes de modes glissants d'ordre supérieur. Cette technique étudiée au laboratoire [hal-00258083], a été adaptée dans le cadre d'un projet de recherche avec la DGA [hal-00207663] en collaboration avec l'IRCCyN-UMR

6597, pour le positionnement de gouvernes électropneumatiques d'objets volants – activité 16.

- Des travaux théoriques et méthodologiques en commande robuste sur l'analyse de la performance robuste des systèmes non linéaires incertains (Lyapunov et entrée/sortie) et la commande des systèmes à paramètres variant dans le temps (LPV). Collaborations avec le laboratoire MIG de l'INRA, le département Automatique de Supélec, EADS, le LETI du CEA, CERT-ONERA, Astrium – Contrats : Robust LPV Astrium/ESA – [European Space Agency Project "Robust LPV Gain Scheduling Techniques for Space Applications", 2007-2009] - activité 18
- L'étude de l'adéquation modèle de conception/problème de conception en terme d'analyse structurelle pour la contrôlabilité, l'inversion et le découplage entrées/sorties a permis le développement des activités sur le dimensionnement de systèmes mécatroniques en collaboration avec l'équipe Actionneurs et Systèmes. Afin de guider la spécification des trajectoires en sortie pour l'aide à la rédaction du cahier des charges des problèmes liés au couplage de l'inversion et de l'optimisation dynamique ont été résolus en s'appuyant sur des formulations énergétiques [projet ANR-RNTL SIMPA2, 2006-2009], [projet Européen OpenProd, Open Model-Driven Whole-Product Development and Simulation Environment, 25 partenaires – mai 2009 à avril 2012]) - activité 18
- La conception, le développement et la mise au point du premier simulateur d'accouchement dédié à la formation des obstétriciens et des sages-femmes, en collaboration avec les Hospices Civils de Lyon. Cette réalisation a reçu le premier prix du jury Sciences de la Vie et de la Santé de la fondation Rhône Alpes Futur le 30 novembre 2007 [hal-00179487], [hal-00368304] – activité 19

### **Principaux faits marquants**

- **Commande des convertisseurs de puissance pour des alimentations des systèmes nomades**: développement des commandes performantes (robuste, mode de glissement) et des techniques de modulation originales (hybride, D-S) à très haute fréquence de découpage en vue d'intégration (4MHz en FPGA, 50MHz en ASIC). Collaboration avec l'Université de Shanghai.
- **Diagnostic énergétique des habitats et l'aide au dimensionnement** : Les projets IRH (Cluster) et MIGRER (ANR) ont été sélectionnés pour représenter les activités de recherche du Pôle de compétitivité TENERDISS au salon POLLUTEC, salon internationale sur la pollution et l'environnement. T. CATALINA a ainsi présenté ces travaux de thèse sur le diagnostic énergétique des habitats et l'aide au dimensionnement lors de cette manifestation
- **Participation au projet du 1er véhicule industriel hybride européen** : en collaboration avec Volvo Powertrain sur la thématique d'hybridation thermique-électrique des véhicules poids lourds ou urbain (bennes à ordures ménagères), le laboratoire Ampère a participé au développement d'une plateforme de simulation HIL (Hardware In the Loop) permettant de vérifier les calculateurs embarqués afin d'en assurer une qualité mesurable.
- **BirthSIM, simulateur d'accouchement pour l'apprentissage sans risque des gestes obstétricaux** : ce simulateur a été réalisé en collaboration avec le Dr O. Dupuis, obstétricien à l'hôpital Lyon Sud, pour former les internes à l'utilisation de forceps obstétricaux. Un prototype, actuellement utilisé aux Hospices Civils de Lyon, a été récompensé en 2007 par le 1<sup>er</sup> prix dans la catégorie « Science de la Vie et de la Santé » lors des 15<sup>èmes</sup> Carrefours de la Fondation Rhône-Alpes Futur.
- **Médaille «Joseph Bramah» au Professeur Serge SCAVARDA, Professeur Émérite au Laboratoire Ampère, INSA de Lyon** : chaque année, cette médaille récompense une personnalité dont les travaux ont contribué de façon significative à l'avancée des connaissances dans le domaine des sciences du Génie Mécanique et plus spécifiquement de l'hydraulique. Ce prix récompense l'ensemble des travaux effectués par Serge Scavarda dans le domaine du Fluid Power.

### **Plate-formes, moyens expérimentaux**

Le Centre d'essais Fluid Power (<http://www.ampere-lyon.fr/spip.php?rubrique51>) d'Ampère, partagé avec l'équipe *Actionneurs et systèmes* est un centre de compétence unique en France. Il a pour objectifs de mettre à disposition les compétences humaines et les matériels nécessaires pour

effectuer des caractérisations de composants ou mettre en oeuvre des lois de commande et évaluer les performances de prototypes, de démonstrateurs ou de matériels industriels. Installé sur le site de l'INSA de Lyon sur 140 m<sup>2</sup>, il est composé de bancs d'essais pneumatiques, électropneumatiques et électrohydrauliques, en vue de modéliser, simuler et commander des systèmes mécatroniques. De plus l'équipe Commande possède une plate-forme de convertisseur de puissance où elle conçoit, réalise et commande des modulateurs de puissance et actionneurs électriques : onduleur matriciel, cartes FPGA, banc moteur synchrone et asynchrone.

### **Positionnement, collaborations et partenariats**

Le tableau suivant synthétise les projets de l'équipe Commande et ses partenariats institutionnels et industriels lors de ce quadriennal. Les actions transversales de l'équipe Commande au sein d'Ampère sont nombreuses : par exemple, d'une part co-encadrements de thèses avec des acteurs des équipes Actionneurs et Systèmes et Electronique de Puissance, et, d'autres part, participation aux axes scientifiques : Méthodes et outils génériques de modélisation, Systèmes mécatroniques et embarqués, Gestion d'énergie et Systèmes à fluide sous pression et robotique médicale.

### **Pertinence et originalité de l'équipe**

Pour des raisons historiques, deux domaines d'excellence sont reconnus à l'équipe : la commande en Fluid Power (électropneumatique et électrohydraulique) et la commande en électronique de puissance (électrique et électrotechnique). Les travaux effectués par l'équipe sont pluridisciplinaires et avec un spectre large que ce soit d'un point de vue théorique ou applicatif. Notre savoir faire issu de la communauté automatique et développé parallèlement et en collaboration avec d'autres grands laboratoires français d'Automatique (IRCCyN, LAAS, Gipsa-Lab...) est mis au profit du développement de différents domaines d'application. Ainsi l'Automatique au sein du laboratoire est un regroupement de compétences d'une part au service du Génie Electrique et de ses grands laboratoires français (SATIE, Laplace, GREEN...) et d'autres part du domaine du Fluid Power et de ses laboratoires français et internationaux (Institut Clément Ader Toulouse-France, Centre for Power Transmission and Motion Control in Bath-UK, Division of Fluid and Mechanical Engineering Systems in Linköping-Sweden, Department of Intelligent Hydraulics and Automation (IHA) in Tampere-Finland). Ampère est à ce jour le seul laboratoire français du « network of Fluid power Centres in Europe ».

## **Autoévaluation : analyse SWOR**

### **Forces**

- Fusion de Compétences au niveau de l'Automatique avec une diversité entre d'une part une recherche amont et une recherche technologique (plus proche du transfert) et d'autre part en terme de champs d'applications (transport, habitat, systèmes nomades et robotique médicale) - Recherche méthodologique et appliquée, présent tout au long du cycle en V de la synthèse de calculateur.
- Compétences sur la transmission et la transformation de l'énergie : Systèmes Electronique de Puissance / Electromécanique / électropneumatique / électrohydraulique.
- Nombre de publications et communications internationales satisfaisant par rapport à la discipline de l'Automatique, et en nette croissance par rapport au quadriennal précédent.
- Reconnaissance sur des microcosmes aux niveaux international et national.
- Centre d'essais Fluid Power + Plate-forme Convertisseur de Puissance.
- De nombreuses collaborations internes ou externes.

### **Faiblesses**

- La place de l'Automatique en France reste à discuter : la « commande » est aujourd'hui très liée au domaine d'application et traitée parfois par des personnes du génie électrique, de la mécanique, du traitement du signal, des Telecom ... sans faire appel aux automaticiens.
- Peu de contrats institutionnels et industriels.
- Affichage très limité vis à vis du CNRS, pas de chercheurs de la section 7 du Comité National.

### **Opportunités**

- Possibilité de plus forte interaction avec le LAGEP
- Rapprochement avec l'équipe EASY, afin de rassembler les compétences au niveau de l'Automatique Continue, en insistant sur les aspects conception, dimensionnement, modélisation système, identification et commande : Power Transmission and Motion Control.



## Risques

- 3 postes de PU et 3 départs à la retraite entre 2007 et 2011

### Message du responsable d'équipe

L'équipe Commande représente une fusion de compétences au niveau de l'Automatique avec une diversité concernant d'une part la recherche amont et la recherche technologique et d'autre part en terme de champs d'applications. Les compétences sont fortes au sein de l'équipe en terme de transmission et de transformation de l'énergie qu'elle soit électrique, électromécanique, électropneumatique ou électrohydraulique. Les travaux de l'équipe sont reconnus sur des microcosmes au niveau international en terme d'expert de la commande des systèmes à fluide sous pression au sein du réseau «Fluid Power Centres in Europe», au niveau national à propos de la commande directe de système dynamique hybride de convertisseurs en électronique de Puissance et de l'analyse et de la commande robuste de système pour le développement d'outil d'aide au design de correcteurs.

Suite à la fusion du 1er janvier 2007, l'équipe a trouvé un équilibre par axe et par domaine d'application, et il semble plus important aujourd'hui de renforcer ces axes et domaines plutôt que d'en créer de nouveaux. Le nombre de publications et de communications internationales est en nette croissance par rapport au dernier quadriennal ainsi que le nombre de contrats institutionnels et industriels. Cependant il est très difficile de réaliser des contrats uniquement sur la Commande, le tissu industriel étant très limité au niveau national et régional dans le domaine du Fluid Power, et les collaborations internationales étant très difficiles ; c'est pourquoi de nombreux projets sont communs avec d'autres équipes du laboratoire. Les besoins en personnel technique compétent au sein du Centre d'essais Fluid Power devient de plus en plus crucial, et une solution doit être trouvée pour pérenniser le poste d'ingénieur de recherche pris en charge sur fonds propres avec l'équipe Actionneurs et Systèmes.

Comme annoncé dans le document de ressources humaines en 2007, le départ à la retraite entre 2007 et 2011 des trois professeurs de l'équipe a été préparé et actuellement la transition doit se faire dans le but de garder les compétences développées et les enrichir. De plus un effort important est nécessaire au niveau des automaticiens du Laboratoire Ampère pour renforcer leur lisibilité, et la question suivante mérite d'être posée : ne faut-il pas rassembler les compétences du laboratoire au niveau Automatique? Ceci aurait sans doute l'avantage de maintenir et renforcer notre reconnaissance au sein de la section 61 du CNU et de montrer notre originalité dans nos domaines d'excellence à la section 07 du CNRS.

	2006	2007	2008	2009	2010
		WARTHE - Marie Curie Europe (NIBEC, Ulster, CMPDT Prague, CREATIS, LIRIS...)			
					OpenProd-Europe (Siemens, SKF, Nokia, eDF, IFP, INRIA, CEA, PSA,...)
ANR		Simpa 2 - ANR RNTL (eDF, PSA Peugeot Citroën, Airbus France, IFP, INRIA, Laplace, G2ELab, INRETS...)			
			MIGRER - ADEME (UVHC/ENSIAME, CETHIL, CSTB, eDF, Espace Eolien Développement)		
Pôle de compétitivité				MACA - Pôle compétitivité MTA (Knorr-Bremse, Irisbus, Leroy Somer, Erceel, LET)	
Cluster		Habitat - Cluster 7 Energies (CETHIL, G-SCOP, LIG, CSTB)			Secure - LUTB (Renault Trucks - Volvo 3P, LaMCoS, INRETS, LEACM, ...)
ADEME			MIGRER - ADEME (UVHC/ENSIAME, CETHIL, CSTB, eDF, Espace Eolien Développement)		
Carnot			IMecatronique@Lyon - Carnot (LTDs, LaMCoS, LGEF, INL, Femto, M3M)		
DGA			Modos glissants électropneumatique - REI DGA (DGA-IRCCyN-MBDA)		
GdR				SEPIC - SEEDS (Supelec)	
		Digital Controller for HF Low-Power Integrated DC/DC SMPS (Univ. Shanghai)			
Internationale		Robustesse et Stabilité des systèmes électropneumatiques (Université de Sfax)			
		Research and application on Networked Control System (NPU Xian, China)			
				Haptique électropneumatique (Laboratoire AMMI Canada)	
			Méthodes d'analyse des régulations du métabolisme des bactéries (INRA)		
Nationale				Conception de réseaux d'horloges synchronisées (CEA LETI)	
				Synthèse de fréquence par couplage d'oscillateurs "splantroniques" (CEA LETI)	
			Modélisation et Commande d'actionneurs électrohydraulique (MOOG)		
CIFRE		Hardware in the Loop - CIFRE (Volvo Powertrain)			
			Commande de groupes frigorifiques - CIFRE (eDF, Schneider Electric, ECAM)		
			Conception alimentation téléphonie mobile - CIFRE (Ericsson)		
				Commande sans capteurs de MSAP - CIFRE (SAGEM)	
				Véhicules 4x4 : systèmes pilotés de transfert de couple - CIFRE (Renault)	
	Diagnostic HISPANO-SUIZA (SAFRAN)		Birth Sim - CHU Lyon		
		HumanSim (Organo)	Expertise Judiciaire (Volvo)	MSAP (SAGEM)	
Contrats			Robust LPV (Astrium satellites, Astrium space transportation, CERT-ONERA)	Stimulateur Pneumatique - CHU St Etienne	
			Actionneur pour le Pilotage - CNES		
			Intégration (Messier Bugatti)	Contrôle d'attitude (FSAT)	
				Analyse de défaut - CEGELEC	
	Systèmes à fluides sous pression et robotique médicale			Méthodes et outils génériques de modélisation	
	Gestion d'énergie			Matériaux dans les systèmes électriques	
	Systèmes mécatroniques et embarqués			Microbiologie et environnement	
	Intégration de puissance en SiC			Electromagnétisme et vivant	



## Equipe Electronique de puissance et intégration

Effectifs au 1er janvier 2009 : 48 personnes

- 14 permanents : 4 PU, 7 MCF, 1 DR, 2 CR
- 31 doctorants, 3 post-docs

Mots-clefs : conception et caractérisation de composants de puissance, matériau semi-conducteur grand gap (SiC, GaN, diamant), gestion d'énergie et réduction de la consommation, stockage énergie, intégration de puissance.

### Objectifs scientifiques

Les actions de recherche de l'équipe EPI sont toutes tournées vers l'amélioration des convertisseurs statiques de l'énergie électrique, et peuvent être classées comme suit :

- intégration (du composant au système, avec contraintes applicatives)
- systèmes embarqués (contrôle numérique, mécatronique)
- structure hybride de convertisseur (matériaux, modules, stockage, architecture)
- haute tension (transport, conversion de l'électricité)
- haute température (véhicule plus électrique)

On peut noter que ces actions ont été menées au plus proche de préoccupations industrielles et portent donc une forte pertinence au sens socio-économique.

Dans la nomenclature de présentation de l'ensemble des questions scientifiques du laboratoire, l'équipe EPI intervient dans les champs suivants :

- Électronique de puissance haute température
- Électronique de puissance haute tension
- Intégration de puissance
- Composants passifs et stockage
- Commande et gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée

L'équipe EPI intervient également en collaboration avec d'autres équipes du laboratoire dans les champs suivants :

- Commande de systèmes mécatroniques
- CEM
- Matériaux magnétiques
- Matériaux diélectriques

### Activités scientifiques

#### Articulation par rapport aux fiches activités

Les activités sont résumées en 4 fiches principalement EPI, 1 fiche où apparaît la forte mutualisation avec l'équipe « Commande » et 2 fiches qui témoignent de collaborations avec d'autres équipes.

- 6-Electronique de puissance haute température
- 7-Electronique de puissance haute tension
- 8-Intégration de puissance
- 11-Composants passifs et systèmes de stockage
- 12-Commande et Gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée
- 10-Matériaux magnétiques (caractérisation, modélisation, ...)
- 1-CEM des systèmes embarqués

La figure située à la fin de ce document explicite les principaux projets et leurs articulations dans le temps, classés par type de financements. Certains projets concernent les actions relatives à la conception de composants à semiconducteur, principalement carbure de silicium (SiC), pour des applications haute température et haute tension (SiC-HT2 par exemple). Ces projets évoluent vers l'environnement de commande rapprochée des composants SiC (JFET ou transistor bipolaire), ainsi que les démonstrations de convertisseurs pour la haute température (SEFORA par exemple) ou les filtres passifs à haute température (FEMINA) ; on trouve également une évolution vers des matériaux à grand gap (DIAMONIX par exemple).

Apparaissent maintenant des projets relatifs à des études technologiques conduisant vers les interconnexions et le packaging (FNRAE EPATH par exemple).

L'activité autour de l'électronique de puissance au sens des architectures vient ensuite avec les projets liés par exemple au pôle de compétitivité LUTB-2015.

Enfin, on trouve des projets relatifs à l'électronique de puissance très basse tension ou encore gestion d'énergie intégrée.

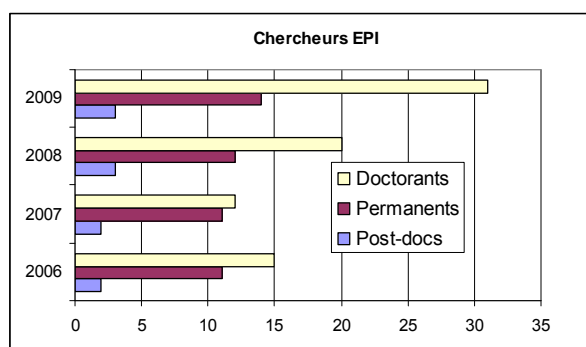
On peut noter l'évolution des projets vers des programmes mieux dotés financièrement, et qui évitent d'avoir à répartir le coût des activités technologiques sur plusieurs appels à projet. La participation de l'équipe EPI à 3 projets FNRAE récents concrétise la confiance que nos partenaires industriels portent aux compétences de l'équipe. L'ouverture du guichet « ANR » a profité à l'équipe puisque 5 projets ont été ou sont encore traités par l'équipe, dont elle est porteuse pour 3 d'entre eux.

L'évolution du nombre et du volume des projets en cours au sein de l'équipe est également le reflet de l'évolution du nombre de chercheurs impliqués (permanents, post-doctorants et doctorants). Nous rappelons que l'équipe accueille régulièrement des étudiants en stage de recherche Master2. L'accès aux étudiants de bon niveau est pourtant difficile à cause du fait que certaines disciplines demandées par nos activités de recherche ne figurent pas au programme des masters dans lesquels nos enseignants-chercheurs sont impliqués.

Les projets ambitieux sont pluri-partenaires et donc doivent également servir à renforcer les liens au sein de la communauté. Or Ampère, et plus particulièrement l'équipe EPI participe activement à l'animation du GdR SEEDS, qui fédère les laboratoires de Génie Electrique. Il est intéressant de constater que les projets ANR ont amoindri les effets bénéfiques du GdR sur la communauté en recentrant les travaux collectifs des laboratoires sur quelques partenaires au détriment de réflexion à l'échelle de l'ensemble des laboratoires.

Peut-être la difficile évolution de la plateforme de 3DPHI, est révélatrice de ce morcelage imposé par l'organisation en projet.

La figure ci-après représente l'évolution des personnels au 1<sup>er</sup> janvier de chaque année.



Cette figure appelle plusieurs commentaires :

- La ressource humaine affectée aux projets a évolué favorablement en l'espace de 4 ans.
- La part de post-doctorants reste faible au regard du nombre de projet : ceci est dû à la difficulté de recrutement en 2007 et 2008, alors que l'effet « ANR » se fait sentir.
- L'augmentation du nombre de doctorants est une bonne chose en soi mais se heurte à deux limitations : la taille du vivier d'étudiants candidats, en baisse autant en nombre qu'en qualité, et le nombre limité de permanents, donc d'Habilités, ceci croisé avec la limite d'encadrement imposée par les établissements.
- Le support technique est assuré par 1 ingénieur d'études et 1 technicien nommé fin 2006. Il y a également saturation de ce côté au sein d'une équipe qui manipule beaucoup de technologie.

Si on relate le nombre de projets par rapport au nombre de chercheurs, on constate que l'équipe EPI a atteint très nettement une saturation en terme de projet, l'empêchant de consacrer des efforts pour le montage de projets plus visibles (FP7) par exemple.

Enfin, la structuration Ampère en équipe porte ses fruits avec l'apparition de projets communs entre plusieurs équipes. L'équipe EPI, par définition des objets industriels qu'elle manipule, a des liens directs avec les équipes « Commande », l'équipe « Actionneurs et systèmes » et l'équipe « Matériaux ». Par ailleurs, elle va contribuer à très court terme à l'évolution du projet « biopile » (équipe « Microsystèmes et Microbiologie »).

Les chercheurs permanents de l'équipe partagent des compétences au sein d'un domaine vaste que sont les structures de conversion d'énergie. A côté des aspects technologiques, dont l'intégration, existent des aspects caractérisations, conception, modélisation, sûreté de fonctionnement..

### Faits marquants

- **Limiteur de courant 450 A.** L'expansion des réseaux électriques a fortement contribué à l'augmentation des risques d'apparition de défauts, tels qu'une surtension ou une surintensité. Ces développements ont favorisé l'émergence de dispositifs de protection série. Ce travail présente la conception, fabrication et caractérisation d'un composant de protection série en carbure de silicium de forte densité de puissance. Des composants capables de limiter le courant à 450A pour de fortes valeurs de puissance (de 10 kW à 100 kW) ont été fabriqués et caractérisés. Compte tenu des énergies mises en jeu, des bancs spécifiques de caractérisation ont été développés. La tenue aux surcharges (35 Joules) est de l'ordre de 350  $\mu$ s pour cette gamme de puissance. Cette réalisation ouvre la porte à de nouvelles applications de protection série.

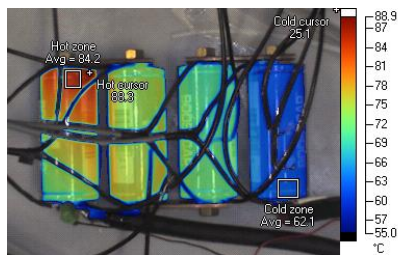
- **Développements d'onduleur haute température.** Aujourd'hui l'activité autour des onduleurs à JFET en SiC est importante et de nombreux démonstrateurs ont été réalisés. Ainsi l'objectif principal est maintenant l'étude de fiabilité (dégradation des JFET en conduction inverse), la réduction des pertes, en intégrant ces optimisations dans les drivers de grille devant fonctionner à haute température.

- **SMPS 250 MHz monolithique.** La gestion d'énergie très proche des cœurs de fonction de systèmes intégrés (System on Chip - SoC) nécessite des régulateurs de tension précis et véloce. Ces deux caractéristiques ajoutées à la contrainte de surface silicium poussent vers une très forte montée en fréquence de découpage. Les enjeux de conception de tels convertisseurs DC-DC concernent la compatibilité électromagnétique (chemin puissance-commande), la régulation (dont l'approche analogique trouve ses limites), ainsi que le rapprochement des composants passifs sous la forme d'une seconde puce (SiP). Le laboratoire a validé certaines approches originales de conception par la réalisation d'un convertisseur monolithique de tension à une fréquence de découpage de 250 MHz. Sa puissance de sortie atteint 1 W pour 0.9 V avec un rendement maximal de 83% pour un courant pic de 0.7 A. La bande passante de régulation grands signaux atteint 18 MHz. Cette réalisation ouvre l'accès à la mise en œuvre de gestion globale d'énergie au niveau d'un système embarqué type appareil nomade (téléphone mobile, ordinateur portable, etc).

- **Systèmes de stockage d'énergie électrique dans les véhicules terrestres.** Le laboratoire travaille depuis quelques années sur l'intégration des systèmes de stockage d'énergie électrique dans les véhicules de transport terrestre. Cette activité a été renforcée depuis l'année 2007 correspondant à l'implication de notre laboratoire dans un projet du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck & Bus » en collaboration avec IRISBUS (IVECO). Dans ce cadre nous étudions la mise en œuvre et la durée de vie d'un système de stockage d'énergie par supercondensateurs récupérant l'énergie de freinage d'un trolleybus. Nous élaborons une modélisation électrothermique prenant en compte le vieillissement des supercondensateurs. Des vieillissements accélérés sont appliqués à un grand nombre de composants (environ 200), ce qui, nous permettra d'avancer dans la détermination de modèles complets de vieillissement. L'optimisation de différents systèmes d'équilibrage des supercondensateurs a été étudiée en termes de performance et de fiabilité. Par ailleurs, dans cette activité, nous collaborons également avec RENAULT TRUCKS sur l'optimisation des cycles de charge-décharge des batteries lithium-ion dans un véhicule industriel au regard des pertes occasionnées et de leur fiabilité.



Photographies de différents onduleurs (H2T-Tech, SEFORA 1, 2 et 3)



Répartition du champ de température pour des supercondensateurs

### Plateformes, moyens expérimentaux

L'équipe EPI possède une plate-forme de caractérisation des composants de puissance (sous forme nue ou encapsuée) avec deux spécificités : composants haute tension et composants haute température. Les appareils de mesure et les platines de test spécifiques permettent de mesurer des courants faibles (pA) et forts (quelques centaines d'A), des tensions élevées (12 kV) dans une atmosphère contrôlée, avec une température comprise entre -190°C et 800°C. Le banc de mesure OBIC (Optical Beam Induced Current) est unique en France et permet d'extraire les coefficients d'ionisation de matériaux semiconducteurs à large bande d'énergie interdite à différentes températures.

L'équipe possède également un centre de caractérisation et de fiabilité des dispositifs de stockage d'énergie. Celui-ci comprend des enceintes climatiques, un spectromètre d'impédance 10  $\mu$ Hz 8 MHz, un banc de cyclage 30 V, 500 A, etc.

### Positionnement, collaborations et partenariats

Outre les collaborations ponctuelles avec d'autres laboratoires lyonnais, français et étrangers, l'équipe entretient des relations fortes avec plusieurs industriels comme Alstom, la DGA, le groupe SAFRAN, Schneider-Electric, STM, IRISBUS, Renault Trucks... pour les aspects applicatifs et les membres de l'équipe EPI sont impliqués dans des organisations scientifiques au niveau national et international.

- **Au niveau régional**, l'équipe EPI participe activement au pôle SiC-lyonnais constitué des laboratoires INL, LMI, IN2P3. Ce pôle regroupe essentiellement des moyens de réalisation technologique dans la salle blanche « Nano-Lyon », accélérateurs de particules pour le dopage par implantation ionique (IPNL), croissance épitaxiale (LMI) et simulation et caractérisation électrique (Ampère).
- **Au niveau national**, de par ses domaines de compétence et ses objectifs scientifiques, l'équipe participe à l'animation scientifique au sein de 2 GDR : le GDR SEEDS (Systèmes d'Energie Electrique dans leurs Dimensions Sociétales), le GDR DIAMANT (Elaboration, fonctionnalisation, physique et applications du diamant). Cette participation est particulièrement active au sein du GDR SEEDS, H. Morel étant le directeur du GDR.  
**Au niveau international**, Bruno Allard, membre de l'équipe EPI représente le GDR SEEDS au niveau du réseau et de l'organisation européenne ECPE (European Center for Power Electronics - [www.ecpe.org](http://www.ecpe.org)) et plus spécifiquement, il est membre du bureau. De nombreuses collaborations existent avec le CNM (Centre National de Microélectronique – [www.cnm.es](http://www.cnm.es)) pour son expertise sur la réalisation des composants. D. Planson est membre du comité scientifique de la conférence européenne et internationale (ECSCRM et ICSCRM – Conference on Silicon Carbide and Related Materials).
- L'originalité des travaux de l'équipe se trouve également dans l'établissement des modèles de composants en statique, dynamique avec prise en compte de l'auto échauffement pour la conception avec les simulateurs circuit.

### Pertinence et originalité de l'équipe

L'équipe EPI est la seule équipe en France à travailler sur les composants de puissance en carbure de silicium, en allant de la conception, la caractérisation et la modélisation des différents composants pour répondre à des applications spécifiques (haute tension et haute température).

L'originalité des travaux de l'équipe se trouve également dans l'établissement des modèles de composants en statique, dynamique avec prise en compte de l'auto échauffement pour la conception avec les simulateurs circuit. Autoévaluation : analyse SWOR

## Autoévaluation : analyse SWOR

### Forces

- Une forte dynamique (de 11 permanents en 2006 à 14 permanents au 1/1/2009).
- Spectre scientifique large du matériau au convertisseur en passant par la physique du composant
- Des axes scientifiques reconnus : intégration de puissance en SiC, conception et modélisation de composants SiC, systèmes haute température, sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage
- Des équipements performants (banc OBIC, plate-forme de caractérisation des composants et des systèmes de stockage)
- Utilisation de la plateforme du pôle technologique SiC lyonnais.

### Faiblesses

- Saturation des effectifs compte tenu d'une très (trop) forte demande industrielle.
- Localisation sur 2 lieux géographiques (Ecully, La Doua), 4 établissements, 3 bâtiments : pas d'identité labo
- Manque de synergie entre les équipes
- Difficulté de recrutements à tous les niveaux (M2R, Doctorants, post-doc) – filière étrangère à développer et pérenniser.
- Peu de projets européens, même si nous avons des collaborations européennes avec nos relations industrielles et le CNM.

### Opportunités

- Mise en place d'un partenariat renforcé avec le CNM (laboratoire européen).
- Rapprochement avec le laboratoire Prime (Tarbes) pour les aspects packaging
- Collaboration privilégiée avec des établissements ou des structures liés aux transports compte tenu de leur forte concentration locale (Renault Trucks Volvo, Iveco Irisbus, pôle de compétitivité Lyon Urban Truck & Bus 2015, INRETS, ...)
- Forte implication technologique sans moyens propres impliquant des collaborations.

### Risques

- Risque d'éparpillement lié au spectre large des recherches
- Risque économique des contrats majoritairement d'origine publique.
- Risque de devoir régulièrement refuser de nouveaux contrats pour cause de saturation de l'encadrement.
- Niveau élevé des montants financiers nécessaires aux activités technologiques.
- Externalisation des moyens technologiques entraînant des contraintes supplémentaires et une détention limitée des résultats.

## Message du responsable d'équipe.

Le domaine des études menées par l'équipe EPI possède un spectre large, allant du matériau semi-conducteur aux applications systèmes en passant par le composant, avec un objectif général d'intégration. L'équipe EPI contribue fortement à la demande sociétale pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, car l'électronique de puissance est aujourd'hui au cœur des projets d'électrification, eux-mêmes premiers contributeurs de la réduction de la consommation d'énergie (transport, industrie...).

L'équipe a été renforcée par l'arrivée de deux Enseignants-Chercheurs et d'un chargé de recherches permettant d'étendre le domaine d'études vers les composants spécifiques et systèmes haute tension, la CEM et le packaging haute température. Ceci augmente la cohérence des axes de recherche et permet d'offrir une meilleure réponse aux attentes industrielles. L'équipe a bénéficié d'une allocation de recherche fléchée en 2008 pour amorcer un nouvel axe de recherche sur les composants de puissance en diamant et d'un contrat doctoral prioritaire en 2009 pour un développement transversal avec l'équipe ingénierie écologique.

Néanmoins, on peut se poser la question de savoir si l'adéquation entre le nombre de chercheurs et les activités doit être maintenu en l'état ? En effet, les activités basse-tension silicium sont de plus en plus associées aux thématiques « système » dans les autres laboratoires, or seuls les aspects gestion et conversion sont étudiés à Ampère. Doit-on accueillir des chercheurs extérieurs, ou bien adhérer à une plateforme inter-laboratoires pour pérenniser cette thématique ?

Enfin, le nombre de contrats croissant peut s'expliquer par la part croissante de la thématique énergie et un accent fort sur les recherches de systèmes plus performants (plus efficace, plus léger, pouvant fonctionner à plus hautes températures, moins bruyant...).





## Equipe Matériaux

Effectifs au 1er janvier 2009 : 15 personnes

- 6 permanents : 1 PU, 5 MCF
- 9 doctorants

Mots-clefs :: Haute Tension, Isolants et Matériaux Diélectriques, Matériaux Magnétiques, Préclaquage et Claquage Diélectrique, Foudre, Hystérésis Dynamique, Modélisation Comportementale, Caractérisation Expérimentale, Environnement, Dépollution, Matériaux Ecologiques, Ecoconception.

### Objectifs

L'équipe Matériaux est composée de six enseignants - chercheurs qui se répartissent entre les deux thématiques Matériaux diélectriques et haute tension d'une part et Matériaux et circuits magnétiques d'autre part. Elle a pour objectif l'approfondissement des connaissances sur les phénomènes dans les matériaux, leur caractérisation et leur modélisation en vue de leur mise en œuvre dans les matériels et systèmes du Génie Electrique, dans des conditions optimisées et compatibles avec l'environnement.

### Activité scientifique

L'activité de l'équipe se décline en deux axes principaux :

- les matériaux magnétiques, actuels et nouveaux, pour lesquels une caractérisation fine et une modélisation comportementale temporelle sont nécessaires en vue d'une utilisation dans les actionneurs rapides ou les éléments à haute intégration.
- les matériaux diélectriques et les phénomènes de préclaquage et de claquage dans les gaz, liquides et solides industriels, actuels et surtout futurs, qui seront plus écologiques ; ceci concerne aussi la foudre, pour une optimisation des moyens de protection des structures.

Les recherches s'appuient sur des moyens expérimentaux exceptionnels en haute tension, sur des bancs d'essais spécifiques en comportement dynamique des matériaux magnétiques jusqu'en haute fréquence, et sur des moyens de calcul et de simulation. Les actions menées par l'équipe peuvent être déclinées comme suit :

#### Matériaux diélectriques

##### 1. Structures isolants mixtes – Phénomènes d'interfaces

- Interfaces solide/gaz : cette action menée en collaboration avec la société AREVA T&D, porte sur la caractérisation des décharges dans les gaz et mélanges, et aux interfaces solides/gaz et mélanges. Elle a pour objectif de mieux comprendre leur développement sur de nouveaux matériaux solides pour équipements haute et moyenne tensions (appareils de coupure en particulier). La nature fractale de ces décharges surfaciques est en cours d'analyse.
- Interfaces solide/liquide : l'étude des décharges glissantes se développant aux interfaces solide/liquide est d'une grande importance pour la conception et le dimensionnement de composants (traversées et pressboards) pour les appareils HT et MT (transformateurs et condensateurs de puissance). Nos travaux ont porté principalement sur l'influence des propriétés physicochimiques et des paramètres géométriques de l'interface, de la tension et de la pression hydrostatique sur les caractéristiques de ces décharges. Nous avons démontré **l'existence d'une relation entre la dimension fractale et les propriétés physiques et géométriques des constituants de l'interface solide/liquide**. Une collaboration avec la chaire ISOLIME de l'Université du Québec à Chicoutimi - Canada est également en cours pour développer des techniques de diagnostic pour équipements électriques remplis d'huile et plus particulièrement pour les transformateurs et condensateurs de puissance.

##### 2. Etude des phénomènes de pollution des isolateurs - Contournement

Les études menées dans ce sens depuis 1994, tant au niveau théorique qu'expérimental, se sont poursuivies sur le comportement des couches de pollution discontinues rencontrées le plus souvent dans la pratique industrielle. Elles ont permis d'élaborer et de valider un modèle prédictif de contournement tenant compte de l'aspect multi-troncs des décharges et de la discontinuité des bandes de pollution et des caractéristiques spécifiques de chaque bande. Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une collaboration avec l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Algérie.

##### 3. Modélisation de la longue décharge et de la foudre - Applications

Nos recherches dans ce domaine se sont poursuivies sur la modélisation de la longue décharge et la foudre négatives. Un modèle prédictif décrivant la totalité de la décharge négative avec ses différentes



phases a été établi et validé. Il constitue un outil pour différentes applications comme la détermination des tensions de tenue (U50) nécessaires au dimensionnement des structures isolantes. Sur la base de la grande similarité, grande étincelle - décharge atmosphérique, un modèle de décharge de foudre négative a été élaboré. L'environnement électromagnétique (CEM) associé au précurseur de foudre et à l'arc en retour a également été caractérisé. Les caractéristiques obtenues à partir du modèle sont conformes aux mesures effectuées lors des décharges naturelles. Ce modèle sera également utilisé pour la prédétermination des paramètres de protection contre la foudre négative tels que le point d'impact et la distance de foudroissement.

#### 4. Interaction champ électrique - environnement

- Elimination des NOx : cette action porte sur la réduction des oxydes d'azote issus de la combustion dans les moteurs thermiques (Diesel) par plasmas froids. Notre but est : (1) de mieux comprendre les processus de fixation des oxydes sur les radicaux générés lors des décharges et de caractériser les décharges dont l'action est la plus efficace ; et (2) d'élaborer un réacteur à plasmas pour l'installer sur un banc d'essai. La construction et l'optimisation de ce réacteur sont en cours de finalisation.
- Décontamination de l'eau : l'objet de cette étude est d'analyser l'influence des différents paramètres afin de définir un protocole permettant une décontamination optimale d'un liquide donné contenant un type défini de bactéries et d'appliquer cette méthode à l'eau. Des essais effectués sur des bactéries « Escherichia Coli » introduites dans une eau pure, ont montré l'efficacité de cette technique.

#### 5. Matériaux Ecologiques pour les Matériels Haute et Moyenne Tensions

- Gaz et mélanges de substitution au SF6 – effet de serre : cette action a pour objectif de répondre aux recommandations internationales (Sommet de Kyoto) qui tendent à restreindre l'utilisation de l'hexafluorure de soufre, voire l'interdire pour préserver l'environnement, ce gaz constituant un agent aggravant de l'effet de serre. Il s'agit de trouver des gaz ou mélanges, autres que le SF6, pouvant être utilisés pour les applications HT et répondant aux critères d'hygiène, de sécurité et d'environnement. Un consortium constitué de plusieurs partenaires universitaires et industriels vient d'être constitué à cette fin autour d'un projet de recherche soutenu par l'ADEME. Ce projet dénommé « AERE » (Appareillage Electrique Respectant l'Environnement) porte sur la recherche de nouveaux systèmes d'extinction d'arc respectant l'environnement pour les appareils électriques de coupure HT.
- Recherche de nouvelles huiles de substitution à l'huile minérale – huiles végétales : l'objectif est de trouver des produits de haute biodégradabilité afin de les introduire dans les transformateurs de puissance. Ainsi, nous avons engagé en janvier 2008 une collaboration avec le Technology and Innovation Center d'AREVA T&D sur les huiles végétales. Il s'agit de caractériser différents esters naturels et de comparer leurs propriétés principales (tension de génération des streamers, tenue diélectrique, facteur de dissipation, transfert thermique, vieillissement, gassing ...) à celles des esters synthétiques et des huiles minérales.

### Matériaux magnétiques

#### 1. Caractérisation

- Caractérisation magnétique locale in situ : cette action a porté sur le relevé du cycle d'hystérésis local des matériaux par la technique des « pointes ». L'intérêt de cette technique est qu'elle permet de revenir aux pertes magnétiques locales dans une géométrie complexe et d'en obtenir une cartographie.
- Base de données de matériaux (Magathèque) : pour pérenniser les données des divers matériaux testés au laboratoire, une base de données a été créée. Celle-ci permet de stocker des mesures ainsi que diverses données concernant le matériau et les paramètres des modèles. Cette base de données est un outil de partage des connaissances du même type que la plateforme de partages de modèles développée dans le projet DIMOCODE dans lequel nous sommes impliqués. Une partie des modèles de comportement des matériaux que nous avons développés sera utilisée dans le logiciel Reluctool.

#### 2. Modélisation et optimisation

- Modélisation du comportement temporel : deux modèles de comportement dynamique de matériau et de circuit (Dynamic & Static Feedback et Diffusion & Wall Motion models) ont été développés au sein de l'équipe. Ces modèles intègrent des lois statiques réalistes de matériaux. A cet effet, des modèles d'hystérésis statiques ont été spécialement élaborés (modèle de la dérivée et réseaux de neurones). L'intégration des modèles dynamiques de matériaux dans des modélisations de dispositifs électromagnétiques par calcul de champ 2D

ou par réseaux de réluctances est en cours d'élaboration ; elle permettra de représenter des régimes transitoires de circuits.

- Détermination des paramètres magnétiques par les algorithmes d'optimisation : l'identification de paramètres associés aux modèles développés ou à d'autres modèles empruntés est faite grâce à des méthodes d'optimisation : algorithme génétique, simplexe ou essaim particulaires. La méthode PSO (essaim particulaires) a été spécifiquement implémentée pour l'identification des paramètres associés au modèle d'hystérésis statique de Jiles Atherton.
- Modélisation de propriétés couplées : l'utilisation des méthodes d'optimisation et des modèles d'identification des paramètres nous a permis de dégager des "tendances" de comportement pour chaque paramètre en fonction de la température de façon très rapide ; les applications visées étant l'électronique de puissance (filtre CEM) et les actionneurs (avionique).

### 3. Conception et dimensionnement d'actionneurs et capteurs innovants

- Logiciel « Reluctool » : en collaboration avec le G2ELAB, un logiciel de conception et de dimensionnement pour des systèmes du génie électrique est en cours de développement. La modélisation est basée sur l'utilisation de réseaux de réluctances. A l'intérieur de ces réluctances, des modèles de propriétés dynamiques de matériaux seront implantés de manière à prendre en compte leur effet sur les régimes transitoires ainsi que sur les pertes.
- Actionneurs fortes dynamiques : un démonstrateur de type actionneur vibreur à forte dynamique a été développé avec des matériaux "innovants" (Soft Magnetic Composite) pour montrer la faisabilité et les conséquences sur la conception en utilisant de tels matériaux.
- Actionneurs et capteurs haute sensibilité : deux types de systèmes industriels ont nécessité l'ensemble des compétences citées plus haut. L'un concerne un système de déclenchement pour disjoncteur différentiel, l'autre, un capteur de courant à technologie effet Hall à boucle fermée. Les approches développées ont permis de répondre avec succès aux problématiques rencontrées dans le milieu industriel pour la modélisation et l'aide à la conception de tels systèmes.
- Capteur magnétique 3D : voir ci-dessous les faits marquants.

#### *Principaux faits marquants*

- **Création d'une base de données de matériaux (Magathèque)** : pour pérenniser les données des divers matériaux testés au laboratoire, une base de données a été créée. Cette base de données est un outil de partage des connaissances du même type que la plateforme de partages de modèles développée dans le projet DIMOCODE dans lequel nous sommes impliqués. Une partie des modèles de comportement des matériaux que nous avons développés sera utilisée dans le logiciel Reluctool.
- **Développement d'un capteur magnétique 3D** : un capteur de champs magnétiques 3D a été conçu en collaboration avec la société Arcelor. Les intérêts principaux sont la précision sur l'orthogonalité des axes et son faible coût. Ce capteur a fait l'objet d'un **dépôt de brevet** n°1000025428 (février 2008).
- **Modèle fractal des décharges surfaciques** : pour la première fois, nous avons montré l'existence d'une relation étroite entre la dimension fractale des décharges se propageant aux interfaces solide/liquide diélectriques sous tension impulsionnelle (chocs de foudre) et les propriétés géométriques et physiques des constituants de l'interface. Ceci constitue un résultat important pour le dimensionnement des structures isolantes dans l'appareillage haute tension et en particulier dans les transformateurs de puissance.
- **Modélisation de la longue décharge négative** : élaboration et validation d'un modèle prédictif décrivant la totalité de la longue décharge négative dans l'air avec ses différentes phases. Ce modèle permet de déterminer l'évolution spatiale et temporelle des différentes caractéristiques de la décharge (courants de leader et arc en retour, trajectoire plausible de la décharge, vitesse instantanée, canal thermique, puissance et énergie injectée dans l'intervalle, instant et tension d'amorçage). Il constitue un outil pour la détermination de la tension  $U_{50}$  (tension à 50 % d'amorçage), paramètre de très grande importance pour le dimensionnement des structures isolantes.

#### *Positionnement et collaborations*

- Collaborations internationales : Université du Québec à Chicoutimi – Canada (Chaire CIGELE (Industrial Chair on Atmospheric Icing of Power Network Equipment) ; Chaire ISOLIME (Canada Research Chair on Insulating Liquids and Mixed Dielectric for Electrotechnology));

Université Technologique de Wroclaw (Politechnika Wroclawska) – Pologne ; EcoTopica Science Institute, Nagoya University ; Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran et Université de Tizi-Ouzou - Algérie ; Université de Yaoundé - Cameroun

- Collaborations et implications nationales : Collaborations avec G2ELAB et DIOM sur les matériaux magnétiques. GDR SEEDS (Systèmes d' Energie Electrique dans leur Dimensions Sociétales) et plus particulièrement aux socles « Matériaux » et au projet INDIGO (inductance intégrée) en collaboration avec l'équipe EPI ; projet « Méthodes et Méthodologies » et au pôle « ISP3D » ; projet DIMOCODE ; programme Energie CNRS ; projet SEFORA ; projet FEMINA.
- Collaborations industrielles : AREVA T&D, BUBENDORFF, DELTEX, SOMFY, EDF R&D, RTE, Schneider, Imphy, DGA, Hispano-Suiza.

### **Pertinence et originalité de l'équipe**

L'équipe matériaux est la seule équipe française à avoir développé une plate-forme de partage des connaissances (mesures, caractéristiques de matériaux,...) sous la forme d'une base de données accessible par internet. Elle est une des deux équipes françaises, avec le G2ELAB, à voir ses modèles de comportement de matériaux intégrés dans un logiciel commercial de dimensionnement (Reluctool, commercialisé par CEDRAT). Au niveau international, l'équipe matériaux est une des rares à développer des modèles de comportement des matériaux magnétiques pour les intégrer dans des logiciels de conception et ou dimensionnement. L'équipe peut aller aussi bien du matériau vers le système que du système vers le matériau.

Aussi, l'équipe matériaux se démarque des autres laboratoires français par des recherches originales en ingénierie haute tension en développant des modèles prédictifs de décharges et en menant des travaux sur la recherche de nouveaux matériaux isolants à moindre impact sur l'environnement. La composante diélectrique bénéficie d'une reconnaissance internationale traduite par de nombreuses collaborations, au travers de thèses en cotutelle et de publications, et participation à des comités scientifiques internationaux.

## **Autoévaluation : analyse SWOR**

### **Forces**

- Des axes scientifiques reconnus : caractérisation/modélisation de comportement de matériaux, physique de la décharge et ingénierie haute tension.
- Des recherches qui peuvent être directement utilisées pour l'aide à la décision stratégique, lors de la phase de conception
- Collaborations étroites sur de nombreux projets avec des industriels et avec nos partenaires universitaires
- Reconnaissance au niveau mondial comme étant le seul laboratoire représentant la haute tension en France (participation à 8 comités scientifiques de conférences internationales)
- Thèmes novateurs : matériaux répondant aux exigences et chartes sur l'environnement : recherche de gaz à effet de serre réduit en remplacement du SF6 ; recherche de nouveaux liquides (huiles végétales) pour remplacer les huiles minérales à base de produits pétroliers.

### **Faiblesses**

- Effectif limité (6 EC permanents – 0 CNRS) en particulier pour le sous groupe matériaux diélectriques et haute tension (2 EC)
- Localisation sur 2 lieux géographiques (ECL-UCBL)
- Difficultés de recrutements à tous les niveaux (M2R, Doctorants, post-doc)
- Indices bibliométriques (publications dans des revues, facteur h) concernant le sous groupe magnétiques, qui sont fortement liés aux secteurs disciplinaires.
- Peu de contrats institutionnels (Europe, ...)

### **Opportunités**

- Orientation vers l'éco-conception
- Emergence et développement de recherche sur l'interaction champ – environnement (réduction des NOx)

### **Risques**

- Risque d'éparpillement lié au spectre large des recherches avec un effectif restreint

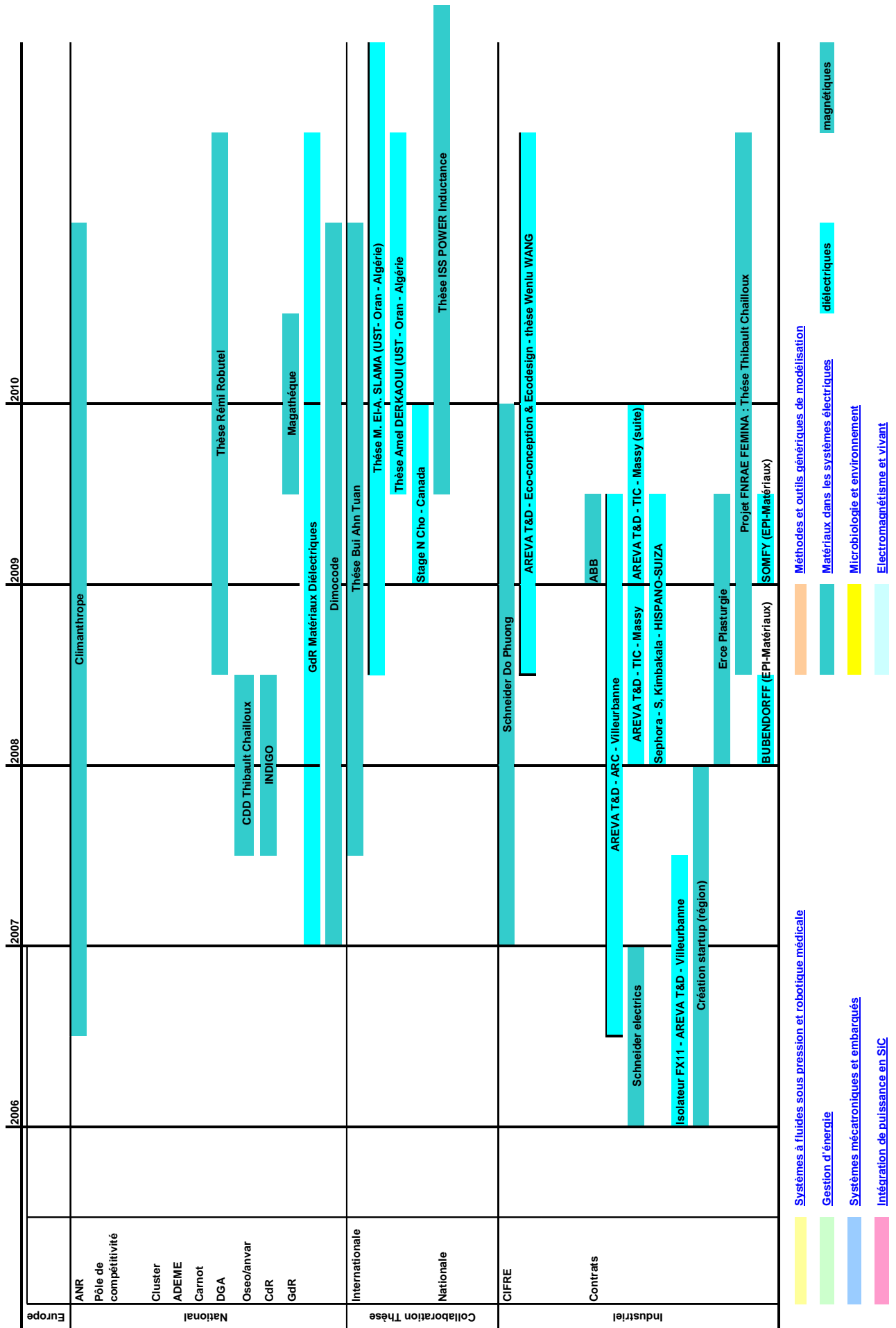
## **Message du Responsable d'équipe**

Les activités de l'équipe portent sur des axes scientifiques reconnus : caractérisation/modélisation de comportement de matériaux, physique de la décharge et ingénierie haute tension. Ces recherches peuvent être directement utilisées pour l'aide à la décision stratégique, lors de la phase de conception. La complémentarité entre les deux sensibilités Diélectriques et Magnétiques s'effectue au travers les actions intégration, conception de composants et systèmes, et éco-conception.

L'équipe matériaux est reconnue au niveau international pour ses compétences en ingénierie haute tension et en coordination de l'isolement et plus particulièrement par les modèles prédictifs de décharge qu'elle développe. Elle utilise pour ses recherches des installations haute tension unique en France. Elle est également la seule équipe française à développer une plate-forme de partage des connaissances sur les matériaux magnétiques (mesures, caractéristiques ...) sous la forme d'une base de données accessible par internet. Et c'est la deuxième équipe française (avec G2ELAB) à voir ses modèles de comportement de matériaux magnétiques intégrés dans un logiciel commercial de dimensionnement.

L'équipe jouit d'une reconnaissance au niveau mondial de par ses publications dans des revues de haut niveau. Au travers de l'équipe, le laboratoire est reconnu comme étant le seul laboratoire universitaire représentant la haute tension en France (participation à 8 comités scientifiques de conférences internationales). L'équipe participe à la dissémination scientifique par la rédaction de chapitres d'ouvrages en français et en anglais.

Il faut cependant souligner le fait que l'équipe fonctionne avec un effectif limité (6 EC permanents – 0 CNRS) en particulier pour le sous groupe matériaux diélectriques et haute tension (2 EC). Malgré sa localisation sur 2 lieux géographiques (ECL - UCBL), l'équipe arrive à fonctionner correctement et à coordonner ses actions.



## Equipe Microsystèmes et microbiologie

Effectifs au 1er janvier 2009 : 26 personnes

- 10 permanents : 2 PU, 2 MCF, 1 DR, 1 CR, 1 CR IRD, 2 IR CNRS, 1 AI MESR
- 8 doctorants, 8 post-docs

Mots-clefs : Métagénomique, Adaptation des communautés bactériennes, Biodépollution, Bioremédiation, Ingénierie Ecologique, Biopiles, Champs électromagnétiques, Diélectrophorèse, Electroporation, Electrotransformation, Manipulation cellulaire.

### Objectifs scientifiques

#### Contexte

Les études concernant les différentes interactions entre champs électromagnétiques et le monde vivant constituent une thématique fondamentale originale et prometteuse avec de très nombreuses applications en réponse à des questions sociétales. Si les effets potentiellement néfastes des champs électromagnétiques sont souvent évoqués au niveau du grand public, ils ne doivent pas faire oublier toutes les applications utiles qui peuvent découler d'une maîtrise des différents effets de ces champs sur les organismes vivants : applications thérapeutiques, traitement des sols et des effluents liquides. Le Laboratoire Ampère, lors de sa création, a affiché un axe prioritaire « Electromagnétisme et vivant » montrant ainsi l'importance qu'il attachait à cette thématique de recherche qui s'appuyait essentiellement d'une part sur l'équipe «Modélisation» et d'autre part sur la création de l'équipe «Microsystèmes et Microbiologie». Cette association entre biologistes et chercheurs en électromagnétisme avait pour ambition de relever un double défi à savoir la constitution d'une équipe de recherche dans laquelle chacune des communautés devait maintenir une productivité scientifique élevée dans ses champs thématiques propres mais aussi participer à l'élaboration progressive de projets pluridisciplinaires basés sur les compétences complémentaires.

#### Rappel des objectifs 2007 et évolutions

Nous présenterons plus loin les principaux résultats spécifiques dans chacune des thématiques mais l'élaboration de la pluridisciplinarité de l'équipe s'articulait au tour de deux axes principaux de recherche :

- Interaction champ-cellule élémentaire : cet axe de recherche est né de la constatation qu'il était indispensable compte tenu de la complexité du comportement de la matière vivante de maîtriser les interactions au niveau élémentaire de la cellule.
- Interaction champ-population / communauté cellulaire : il s'agissait d'appréhender qualitativement et quantitativement comment l'application d'une contrainte électromagnétique modifie la structure des communautés bactériennes présentes naturellement dans un milieu comme le sol. Ces effets étant plurifactoriels, le champ d'investigation est très vaste. En effet, les champs électromagnétiques peuvent agir aussi bien au niveau abiotique (déstructuration de la matrice tellurique, modification de la bio-accessibilité des nutriments), qu'au niveau biotique (transfert horizontal de gènes par électrotransformation, lyse des espèces les moins résistantes).

Initiée avec l'étude au niveau fondamental de l'injection de courant dans le sol lors de la décharge de foudre sur les échanges de gènes entre bactéries du sol, la collaboration entre chercheurs en électromagnétisme et microbiologistes environnementaux s'est progressivement accrue de plusieurs projets où le volet très fondamental de la recherche qui est développée trouve rapidement des applications dans le cadre de la bio-ingénierie et de l'Ingénierie Ecologique. Nous pouvons citer trois exemples :

- Application de l'injection de courant dans le sol pour accroître l'évolution bactérienne et favoriser l'assemblage et l'émergence de nouveaux gènes bactériens codant des enzymes de dégradation des contaminants chimiques les plus récalcitrants.
- Développement d'un projet de piles à combustibles microbiennes (biopiles) pour lequel les travaux des microbiologistes cherchant à comprendre et optimiser la formation du biofilm sur les électrodes par la sélection ou même la construction génétique de souches bactériennes électro-actives sont totalement complémentaires de ceux des spécialistes de SPI travaillant à optimiser la récupération de l'énergie. Ce projet est un des plus explicites exemples de l'intérêt de la complémentarité des compétences fondamentales et appliquées des deux communautés pour l'élaboration d'actions en ingénierie écologique comme celle consistant à produire de l'électricité à partir de déchets organiques contenus dans les effluents domestiques, industriels ou agricoles.



- Développement d'un projet de marquage de l'ADN bactérien par des nanoparticules magnétiques et utilisation de micro-aimants pour déplacer les cellules marquées. Ce projet en totale collaboration entre spécialistes des microsystèmes et microbiologistes d'Ampère va créer une technologie originale, spécifique et sensible tant pour accroître la compréhension des mécanismes de régulation du transfert de gènes in situ que pour le développement d'une nouvelle application de métagénomique où chaque cellule sélectionnée pourra être traitée séparément, jusqu'au séquençage complet de son génome.

Par rapport aux objectifs initiaux, il faut aussi noter que le départ de l'équipe de physicochimie (N. Jaffrezic) de l'Ecole Centrale de Lyon ne nous a pas permis de développer l'activité biocapteur initialement prévue.

## Activité scientifiques

### Activités

Les activités de recherches recouvrent les axes que nous avons décrits dans le projet du précédent quadriennal aux évolutions annoncées ci-dessus près. Elles se déclinent selon 3 directions :

#### Activité « Interaction champs-cellule »

Le développement des moyens expérimentaux nécessaires à la caractérisation électromagnétique des cellules a été un point important de notre activité. Un travail conséquent a été effectué sur la prise en compte de la variabilité des paramètres des cellules biologiques. D'autre part, un modèle de la cellule avec un modèle asymptotique de membrane permettant de s'affranchir du problème des différences d'échelle spatiale a été développé.

#### Activité « Génomique Microbienne Environnementale : adaptation et Evolution »

Le Laboratoire Ampère a rapidement identifié la nécessité pour les chercheurs en microbiologie de continuer à développer une thématique de recherche sur la microbiologie environnementale par des approches de génomique, activité qui se situe en amont et constitue l'indispensable socle fondamental des projets pluridisciplinaires développés avec les autres membres de l'équipe. Cette nécessité s'est traduite par la différenciation du groupe de « Génomique Microbienne Environnementale » (GME) et l'affichage de l'axe prioritaire « Microbiologie et Environnement » au niveau du Laboratoire.

Les principales questions scientifiques abordées par le groupe GME ont trait à l'évolution et l'adaptation de la communauté bactérienne particulièrement quand celle-ci est soumise à des stress biotiques et abiotiques. Pour appréhender ces thématiques l'équipe a fortement investi dans le développement de méthodes permettant d'inventorier la diversité bactérienne en terme populationnel et/ou fonctionnel par une approche métagénomique permettant de s'affranchir du fait qu'une très faible proportion de bactéries peut être cultivée (1% dans le sol). Les travaux ont mis en évidence différents mécanismes d'adaptation bactérienne, notamment l'importance du Transfert Horizontal de Gènes et de la recombinaison. Ces études métagénomiques sont complétées par des travaux expérimentaux plus conventionnels sur l'organisation et la régulation de certains gènes d'adaptation ou d'autres qui ont révélé les mécanismes qui permettent aux bactéries préserver l'intégrité de certaines régions de leur génome tout en acquérant de la diversité génétique sur d'autres segments d'ADN.

#### Activité « Ingénierie Ecologique »

Cette activité a pris corps assez rapidement s'enracinant dans les travaux fondamentaux des différentes composantes et résulte très souvent de la complémentarité des compétences. Grâce à la métagénomique cette thématique a aujourd'hui accès au quasi inépuisable réservoir de ressources génétiques que recèlent les communautés bactériennes d'un écosystème (sol, eaux...) pour développer des fonctionnalités qui seront mises en œuvre avec les spécialistes des SPI. Deux exemples illustrent cette activité :

- Comme déjà indiqué le projet « piles à combustibles microbiennes » (biopiles) est un projet phare dans la mesure où il combine les compétences de la microbiologie et du Génie Electrique. Si les travaux en laboratoire ont abordé l'identification bactérienne sur les surfaces des électrodes, avec notamment la mise en évidence d'une sélection de populations électroactives au niveau des biofilms et de populations majoritaires se différenciant de celles du compartiment aqueux. Les applications de ces travaux sont déjà en cours, spécialistes du Génie Electrique et microbiologistes se complétant pour développer un réacteur expérimental dans une station d'épuration qui assure une production d'électricité dont les



variations renseignent sur les dysfonctionnements de la station en cas de pollutions chimiques.

- L'activité d'ingénierie écologique se manifeste également avec le développement d'une nouvelle approche d'isolement de gènes d'intérêt à partir de la microflore non cultivable du sol. Cette approche basée sur l'utilisation d'une souche bactérienne hautement recombinogène pour piéger des fragments d'ADN ciblés trouve une première application en ingénierie écologique dans le cadre de l'évaluation de l'impact environnemental des plantes transgéniques. Associées à d'autres méthodes expérimentales les travaux ont permis de montrer que, du fait de leur origine procaryotique, les gènes des transgènes de ces plantes peuvent être transférés à des fréquences plus élevées que les autres gènes de la plante. Pour les transgènes à vocation agronomique, le risque associé à de tels transferts est négligeable du fait principalement de la présence dans le génome des bactéries telluriques de ces mêmes gènes, y compris les gènes de résistance à des antibiotiques. Il faut noter cependant que l'ingénierie écologique pourrait tirer profit de ce transfert de matériel génétique entre plantes OGM et bactéries telluriques si des fonctionnalités à vocation agronomique et/ou environnementale étaient concernées (catabolisme de molécules toxiques par exemple).

### **Plateformes et moyens expérimentaux**

L'accueil de chercheurs en microbiologie s'est traduit par la construction d'une plateforme de microbiologie occupant 150 m<sup>2</sup> qui a dû être totalement équipée. Outre le matériel classique (étuves, hottes à flux laminaire, Poste Sécurité Microbiologique...), cette plateforme dispose de tous les matériels nécessaires à l'analyse du génome par la technologie « puces à ADN » : station d'hybridation, système d'analyse des puces à ADN, robots pour manipulation d'oligosondes... Quelques installations spécifiques sont à signaler: un système de diélectrophorèse permettant la manipulation de cellules dans la gamme 0...80 MHz, un banc d'essai de biopiles permettant le monitoring en parallèle de 50 unités, un banc d'électroformation de liposomes.

Cette plateforme est en cours d'extension sur environ 80 m<sup>2</sup> avec la construction d'une salle de culture de cellules procaryotes et une augmentation du nombre de paillasse permettant d'accueillir dans des conditions correctes l'ensemble des stagiaires et contractuels dont le nombre s'est rapidement accru (de 6 personnes en 2006, l'équipe est passée aujourd'hui à 26 personnes !).

### **Positionnement et collaborations**

Les collaborations sont nombreuses au niveau français et international. On peut citer dans le domaine des microsystèmes le G2Elab (G.Reyne), l'Institut Néel (N.Dempsey), MATEIS (P. Perriat) et l'INL (J.F. Chateaux). Ces collaborations concernent essentiellement la conception, la fabrication et la mise en œuvre de microsystèmes magnétiques pour la manipulation de cellules. Elles viennent compléter la compétence principale de l'équipe qui se situe au niveau des systèmes de diélectrophorèses.

Dans le domaine de l'Ecologie microbienne les collaborations sont encore plus étendues. En métagénomique le principal fait à souligner est la coordination du consortium international « Terragenome » dévolu au séquençage du métagénome d'un sol de référence (plus de 150 scientifiques de 20 pays impliqués) : D'autres programmes se font en collaboration avec : Norwegian University of Life Sciences (A. Frostegard), l'Université d'Oxford (M. Bailey), Rijksuniversiteit (J.D. van Elsas), l'INRA de Jouy-en-Josas (J. Dore, M. Leclerc) et de Dijon (L. Phillipot). Les aspects OGM/plantes sont traités en collaboration avec l'UMR CNRS ISV (Dr Yves Dessaux) et l'Université de Milan (D. Daffonchio). L'adaptation des communautés bactériennes aux environnements extrêmes (métaux lourds...) est réalisée avec IRD LSTM (M. Neyra) et l'Université Paris Sud (J-L Pernodet). Une dernière collaboration est à citer avec l'Université de Penn State (B. Logan) sur les piles à combustibles bactériennes.

### Principaux faits marquants

- **Forte productivité scientifique des chercheurs de l'équipe.** Cette productivité concerne 1) les publications scientifiques, tant en termes quantitatifs que qualitatifs (articles dans des revues spécialisées (AEM, Gene etc) et des journaux généralistes majeurs comme Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), PloS one, Nature Reviews Microbiology 2) la participation à des congrès et la présentation de conférences dans de très nombreux cas sur invitations pour les chercheurs seniors.
- **Forte implication dans des projets de recherche nationaux et internationaux.** Participation des chercheurs du groupe GME dans 11 projets ANR dont trois coordonnés par Ampère, dans plusieurs projets de la région Rhône-Alpes et d'autres agences nationales (AFSSET, BRG, PNETOX) et dans trois projets européens du 7ème PCRD : à signaler plus particulièrement la coordination du projet «Metasoil» ANR génomique microbienne à grande échelle doté d'un budget de 2,2 M€ et du consortium international «Terragenome» visant à séquencer totalement le métagénome d'un sol de référence. La montée en puissance du groupe Microsystème a été concrétisée par l'acceptation de deux projets: un au niveau de la région Rhone-Alpes dans le Cluster MicroNano et un autre au niveau national dans l'appel à projets ANR CES (projet Emergent)
- **Organisation du colloque MicroEngen III** (1 et 2 décembre 2007, 90 scientifiques), séminaire international organisé tous les deux ans à l'initiative de SCOPE (Comité Scientifique sur les Problèmes de l'Environnement) qui a pour but d'identifier les questions émergentes ainsi que les nouvelles priorités de recherche concernant les problèmes d'environnement globaux.
- **Organisation de la réunion scientifique Metastad** (13 et 14 décembre 2008, 100 scientifiques, vingt pays représentés) pour la mise en place du consortium international « Terragenome » (séquençage complet du métagénome du sol).
- **Développement d'une forte activité en Ingénierie écologique** avec le dépôt (et l'acceptation de quatre projets du programme éponyme du CNRS) et la participation d'un chercheur au comité scientifique et stratégique de ce programme.
- **Forte implication dans l'administration de la Recherche.** Membres du conseil scientifique des commissions et associations suivantes : CGG puis HCB, AFSSA, PNETOX, Présidence du comité d'évaluation du programme ANR « GMGE ». Fonctions éditoriales et membres du bureau éditorial de plusieurs revues scientifiques
- **2<sup>ème</sup> prix des 14<sup>èmes</sup> Carrefours de la Fondation Rhône-Alpes Futur**, pour le projet *Production d'électricité par les bactéries lors du traitement d'effluents* (J.M. Monier et T. Vogel)

### Pertinence et originalité de l'équipe

L'association effective et fructueuse au sein d'une même UMR CNRS de microbiologistes et de chercheurs en sciences physiques pour l'ingénieur constitue incontestablement l'originalité de l'équipe M&M. Au niveau français et même européen c'est la seule équipe dans le paysage des laboratoires tels qu'on les connaît aujourd'hui qui présente un aspect pluridisciplinaire aussi marqué. De par cette démarche, cette équipe s'érige en précurseur de la recherche du futur qui devra nécessairement décloisonner les champs scientifiques si elle veut aborder efficacement des disciplines qui ne peuvent être que pluridisciplinaires comme l'ingénierie écologique. Il est cependant nécessaire que la pluridisciplinarité s'ancre dans chacune de ses composantes sur des bases fondamentales fortes. C'était et cela demeurera l'ambition des chercheurs de cette équipe qui tout en se positionnant dans le peloton de tête de la recherche mondiale en microbiologie environnementale et (méta-) génomique occupent une place de plus en plus prépondérante dans le développement de cette nouvelle discipline que constitue l'Ingénierie Ecologique.

### Autoévaluation : analyse SWOR

#### Forces

- Une équipe pluridisciplinaire atypique dans le paysage français des laboratoires tant du Génie Electrique que de la Microbiologie.

- Une implantation réussie au sein d'une unité Ampère d'un groupe de microbiologistes qui a su préserver son potentiel, sa créativité et sa productivité tout en faisant progressivement émerger des projets à l'interface directement liés à l'Ingénierie Ecologique.
- Une équipe qui mène des recherches originales et médiatiques à l'interface électromagnétisme – environnement avec des retombées tant d'ordre fondamental (influence de la décharge de foudre sur l'évolution génétique des bactéries telluriques) qu'appliquées (production d'électricité par les piles à combustibles microbiennes).
- Une équipe qui permet au Laboratoire Ampère d'être reconnu par les instituts INST2I et INEE.
- Une activité contractuelle institutionnelle très importante et une reconnaissance internationale forte.
- Une activité scientifique en forte expansion avec de nouvelles perspectives de collaboration avec les chercheurs impliqués dans l'activité scientifique « modélisation électromagnétique de la cellule ».

### **Faiblesses**

- Des inégalités dans les effectifs des deux composantes de l'équipe et des différences culturelles en ce qui concerne le fonctionnement de la recherche.
- Un cloisonnement des compétences encore trop important (SPI/microbio).
- Des inégalités dans le développement de projets pluridisciplinaires à l'interface entre Microbiologie et Microsystèmes, Microbiologie et Génie Electrique et Microsystèmes et Génie électrique.
- Des difficultés à recruter des étudiants sur des activités à l'interface entre microbiologie et Génie Electrique.
- Un manque de reconnaissance de la bioingénierie, autre que de principe, sur le site ECL qui accueille l'équipe induisant une difficulté pour le recrutement d'EC.
- Une ouverture trop faible sur le monde industriel

### **Opportunités**

- La pluridisciplinarité affichée par l'équipe la positionne dans une situation extrêmement favorable pour être un élément moteur du développement de l'Ingénierie Ecologique en France. Fort de ses compétences en génomique et métagénomique bactérienne le groupe GME est parfaitement armé pour jouer un rôle majeur dans son domaine spécifique et exploiter les ressources génétiques nouvellement accessibles pour les mettre à la disposition de l'Ingénierie Ecologique grâce à la complémentarité affichée avec les spécialistes des SPI.
- Le développement de collaborations du groupe microsystèmes avec des laboratoires du PRES de Lyon et de la région impliqués dans les nanotechnologies ou dans l'ingénierie pour la santé est susceptible d'étendre le spectre des compétences de l'équipe et leur mise à disposition des projets d'Ingénierie Ecologique.

### **Risques**

- Echec des futurs projets pluridisciplinaires par manque de reconnaissance institutionnelle et départ du groupe de microbiologistes d'Ampère pour une situation plus conventionnelle.
- Scission de fait entre les deux groupes de l'équipe.
- Disparition du groupe Microsystèmes en raison la faiblesse de l'effectif.

### **Message du responsable de l'équipe**

Si les travaux de ces trois dernières années nous confortent dans le choix qui été fait de créer une équipe Microsystème et Microbiologie lors de la dernière contractualisation, on peut légitimement penser que la situation n'est pas stabilisée. Il faut encore renforcer les thèmes de collaborations entre la composante microbiologie et la composante ingénierie de l'équipe (et plus largement du laboratoire). Toutefois ceci ne sera réellement possible que par une augmentation du nombre de chercheurs de l'équipe dans toutes ses composantes, Microsystèmes, Génie Electrique et Microbiologie et la reconnaissance plus formelle et soutenue financièrement et en termes de postes de l'activité « Bioingénierie » par les instances de l'Ecole Centrale. Ce soutien permettrait dans un premier temps du moins de combler le déficit en physico-chimistes datant du dernier renouvellement suite au départ de chercheurs qui a considérablement affaibli la composante « Microsystèmes » de l'équipe. Il est également légitime de se poser la question de la pertinence d'un éventuel rattachement à l'équipe Microsystèmes et Microbiologie de chercheurs travaillant sur l'axe « Electromagnétisme et vivant ».

Europe	2006	2007	2008	2009	2010	2011
					<b>OSIRIS</b> (6ème RTD) 226k€ Optimized Strategies for Risk Assessment of Chemicals Based on Intelligent Testing	
						<b>METAEXPLORE</b> (7ème TTD) 450 k€ - Exploiting the soil metagenome for antibiotics, pollutant degradation

Méthodes et outils génériques de modélisation

Matériaux dans les systèmes électriques

Microbiologie et environnement

Electromagnétisme et vivant

Systèmes à fluides sous pression et robotique médicale

Gestion d'énergie

Systèmes mécatroniques et embarqués

Intégration de puissance en SiC



## Equipe Modélisation

Effectifs au 1er janvier 2009 : 17,5 personnes

- 10 permanents : 2 PU, 2DR CNRS, 3 MCF, 2 CR CNRS, 1 IR CNRS
- 6,5 doctorants, 1 post-doc

Mots-clefs : Electromagnétisme BF et MF, modélisation numérique, éléments finis, équations intégrales, variabilité, optimisation, problème inverse, conception, champs et vivant.

L'ancrage thématique principal de l'équipe Modélisation est l'axe scientifique « méthodes et outils génériques de modélisation numérique pour l'électromagnétisme », avec des participations significatives aux axes « matériaux dans les systèmes électriques », « électromagnétisme et vivant » et « Microbiologie et environnement ». Historiquement dirigées vers les applications classiques du génie électrique (Haute tension, chauffage par induction, CND, ...) et vers la compatibilité électromagnétique (interactions électromagnétiques au sein d'un système électrotechnique, ou entre systèmes), nos préoccupations se sont élargies depuis quelques années aux interactions entre champs électromagnétiques et systèmes biologiques/vivants.

Ce thème est porteur d'une image très positive au niveau sociétal. Pour nous les chercheurs, il est néanmoins passionnant, difficile, et riche d'apports scientifiques potentiels : on aborde en effet par ce biais des problématiques multi physiques, multi modèles, multi échelle, et d'autres questions comme la variabilité. Il nous pousse fortement vers l'interdisciplinarité ; les collaborations et méthodologies mises en œuvre dans ce contexte particulier auront certainement des retombées dans d'autres domaines, fondamentaux ou applicatifs.

L'équipe est aujourd'hui constituée de 10 permanents<sup>1</sup> et 8 à 12 doctorants ; plus la présence régulière de un ou deux « post-doc », et de chercheurs invités (de Belgique et du Brésil essentiellement)<sup>2</sup> par l'Ecole Centrale ou dans le cadre d'accords internationaux spécifiques (CAPES-Cofecub pour le Brésil).

## Objectifs et résultats scientifiques

L'objectif de l'équipe concerne la modélisation de l'électromagnétisme et la numérisation des modèles, pour l'analyse et pour la conception optimale de composants ou systèmes, y compris biologiques.

### Contexte des recherches

Le laboratoire Ampère s'intéresse à un large spectre de domaines (Génie Electrique, Electromagnétisme, Automatique, Microbiologie environnementale), dans lesquels la répartition spatiale et temporelle précise des champs électrique et magnétique joue souvent un rôle essentiel. L'équipe travaille sur les modèles et les méthodes numériques génériques qui permettent de calculer ces grandeurs locales et les grandeurs globales pertinentes associées, ou d'améliorer précision et vitesse de ces calculs ; elle travaille également sur la sensibilité des résultats obtenus aux données fournies (variabilité), et sur les problèmes inverses ou d'optimisation dont le problème direct est résolu avec ces méthodes numériques (CND, conception, ...).

Les travaux réalisés s'inscrivent ainsi

- d'une part dans l'effort général de recherche mené sur ces thèmes au sein des laboratoires de Génie Electrique et d'électromagnétisme, avec l'aide de mathématiciens appliqués et de numériciens, aux niveaux international ( « Compumag » International Society, université de Liège, collaborations brésiliennes) et national (GDR Seeds, GDR Ondes, INRIA, ICJ, ... ) ;
- d'autre part en relation étroite avec les applications spécifiques visées au Laboratoire Ampère, principalement à ce jour autour de la CEM pour les dispositifs embarqués et des interactions champs/vivant.

## Activités scientifiques

Depuis le début du quadriennal, ces objectifs généraux se sont concrétisés dans notre participation à 7 activités scientifiques principales, dont chacune fait l'objet dans ce rapport d'une fiche spécifique.

### Méthodes numériques et outils pour la modélisation électromagnétique

Nous regroupons ici les activités de notre équipe les plus « amont » et les plus génériques. C'est le centre des compétences communes des membres de l'équipe, où se construit le dialogue avec les

<sup>1</sup> Noter que 2 de ces 10 cadres ont à la fois des fonctions lourdes de direction locales (Ecole doctorale, Laboratoire) et de représentation nationale (CNU, CPCNU, CN, CPCN). L'un des enseignants-chercheurs est arrivé seulement en 2007.

<sup>2</sup> Pour les chercheurs invités, cumul moyen des séjours : 2 mois par an.



numériciens et mathématiciens appliqués d'une part, le monde de la Conception assistée et de l'optimisation d'autre part. Le GDR SEEDS a défini ce type d'activité scientifique comme un « socle transversal », qui recoupe des domaines plus applicatifs. C'était aussi notre positionnement lors du précédent contrat quadriennal du CEGELY : on retrouve aujourd'hui cette structure en grille, les 4 activités suivantes de l'équipe s'appuyant naturellement sur ces méthodes et outils.

### **Matériaux magnétiques**

L'équipe matériaux est naturellement responsable de cette activité ; une collaboration étroite existe avec l'équipe modélisation, plus spécialement (pour la période concernée par ce rapport) sur les « pertes fer » : des modèles originaux ont été développés et validés expérimentalement par l'équipe matériaux pour les méthodes de réductance. Nous travaillons ensemble, sur cette base, à la construction de modèles précis de pertes fer utilisables dans les simulations numériques à constantes réparties (type éléments finis), en régime transitoire ou régime périodique non sinusoïdal, avec des densités spectrales d'énergie correspondant aux systèmes modernes de l'électronique de puissance. Nous cherchons aussi à intégrer efficacement dans le modèle numérique du matériau des caractéristiques géométriques particulières (invariance partielle dans une direction, empilements, périodicités, ...), de manière à réduire drastiquement les temps de calcul sans perdre en précision ; des post-traitements spécifiques permettent ensuite de retrouver le comportement local « à petite échelle ».

### **Compatibilité électromagnétique**

C'est actuellement l'un des domaines privilégiés d'application des modèles numériques de l'électromagnétisme, en particulier au niveau contractuel. Nous nous intéressons aux aspects sources équivalentes, système et multimodèles, et confrontation aux mesures (responsabilité du centre CEM) ; il existe sur ces points des collaborations étroites avec le G2ELab et le LMAG (EP-USP, Brésil), ainsi qu'avec des industriels pour les systèmes embarqués, en particulier.

### **Interaction champ-cellule (caractérisation, modélisation, mise en œuvre)**

L'apport de l'équipe modélisation concerne ici d'une part le modèle mathématique de la membrane cellulaire (intacte, avec en particulier l'approche asymptotique correspondante ; ou rendue poreuse par de brèves impulsions de champs, travaux en lien avec la biologie moléculaire, recherche de modèles dynamiques d'électroporation) ; d'autre part les méthodes d'identification de paramètres avec données incertaines, l'application typique étant l'identification de paramètres de cellules à partir des spectres de diélectrophorèse ou d'électrorotation.

### **Dosimétrie numérique des interactions champ-vivant (maillage, formulation, variabilité, IHM)**

Le calcul des champs dans le corps humain ou d'autres systèmes vivants pose une série de problèmes de description géométrique précise (à partir de l'imagerie), de maillage, d'identification de propriétés, de variabilité de ces propriétés, de formulations, etc., avec des spécificités qui peuvent aussi dépendre du type d'excitation (harmonique, impulsionnelle, ...), de la gamme de fréquences, ... Une grande partie de l'effort a porté ces dernières années sur les basses fréquences en excitation sinusoïdale, sur l'identification de sources, sur le maillage, et sur une application thérapeutique particulière (optimisation pour l'hyperthermie par micro-ondes) et sur les outils d'IHM correspondants.

### **Génomique environnementale, évolution et adaptation**

L'interaction pluridisciplinaire avec l'équipe « Microsystèmes et microbiologie » a conduit tout récemment à la réalisation d'une interface originale pour l'exploitation de données métagénomique : la fabuleuse évolution des technologies de séquençage d'ADN conduit à des masses de données inimaginables il y a seulement 15 ans, ici sur les populations bactériennes dans des sols très spécifiques de Nouvelle Calédonie. De nouvelles méthodes d'analyse et d'exploitation de données doivent être mises en place pour extraire l'information pertinente et la présenter de manière synthétique et compréhensible. Cette action, qui a d'ores et déjà donné lieu à des publications dans des congrès internationaux, va se poursuivre dans le cadre du projet ANR « Aptitude » et de collaborations avec d'autres instituts de recherche (Université de Clermont-Ferrand).

### **Outils et méthodes pour l'analyse structurelle, le dimensionnement et la robustesse des systèmes**

Cette activité est menée par l'équipe « Actionneurs et Systèmes », avec une problématique d'automatique industrielle. Les questions de la variabilité, de la sensibilité aux paramètres et de la robustesse des systèmes étudiés ou conçus rejoint, avec des modèles de nature très différente, une partie de nos préoccupations. Une direction de thèse commune permet de confronter nos cultures



scientifiques et points de vue au départ très différents ; l'objectif est de trouver pour l'avenir la bonne stratégie pour une collaboration plus étroite des équipes.

### **Principaux faits marquants**

- **Dosimétrie numérique Basse et Moyenne Fréquence** : notre outil de simulation permet aujourd'hui la réalisation d'une dosimétrie numérique (évaluation des effets induits par les champs électromagnétiques sur le vivant à partir du calcul) en 3D, pour toute situation d'exposition à basse et moyenne fréquence. On peut notamment s'intéresser aux organes les plus sensibles (cœur, cerveau, yeux, ...), en visualisant la répartition de la densité de courant ou des apports d'énergie par des techniques modernes d'IHM.
- **Création du LIA franco-brésilien J.C. Maxwell** : ce LIA, qui regroupe 2 laboratoires français (G2ELab UMR5269 et Ampère UMR5005) et 3 équipes de recherche brésiliennes (des Universités Fédérales de Santa Catarina et de Minas Gerais, et de l'Ecole Polytechnique de l'Université de São Paulo), résulte de liens étroits existant depuis 20 an. Les principaux thèmes de recherche abordés concernent en premier lieu 3 sujets relativement théoriques : les modèles numériques pour l'électromagnétisme, les méthodologies de conception et d'optimisation de dispositifs et systèmes lorsque leurs performances sont essentiellement liées à leur comportement électromagnétique, et la construction des modèles de matériaux complexes utilisés, adaptés à ces simulations numériques. Les domaines applicatifs relèvent du bio-électromagnétisme, de la Compatibilité Electromagnétique spécialement des systèmes embarqués, et des actionneurs non traditionnels.

### **Plateformes, moyens expérimentaux**

Même si nos activités sont principalement théoriques ou numériques, elles se font pour partie en interaction étroite avec deux plates-formes expérimentales :

- Centre d'essais CEM (site ECL, <http://www.ampere-lab.fr/spip.php?rubrique13>, <http://www.ampere-lab.fr/spip.php?article9>) : cage de faraday anéchoïque (7mx5mx3m) ; syntoniseur Marconi (9 kHz – 6 GHz) ; amplificateur M2S (10 MHz – 1 GHz) ; matériels de mesure (récepteurs de mesures R&S 9kHz–7GHz ; antennes large bande cornets, log périodiques, biconiques, boucles, fouets ; sonde de champ électrique proche M2S 10kHz–6GHz 200 V/m ; impédance-mètre vectoriel HP 40Hz 110MHz avec sondes ; RSIL mono et triphasé 3x50 kVA ; pince de courant bande passante 150 MHz).
- Plate-forme de mesure de champs de fuite (site UCBL) : à l'aide d'un robot 3 axes, elle permet de déplacer de manière automatique un capteur de champ magnétique autour d'un objet-cible, afin de caractériser le rayonnement basse fréquence de celui-ci. Des sources numériquement équivalentes peuvent ensuite être construites, et utilisées dans des modèles de simulation numérique.

### **Positionnement, collaborations et partenariats**

#### **Au niveau national**

- GDR SEEDS : 1 membre de l'équipe participe régulièrement aux réunions scientifiques du socle Méthodes et méthodologies, et est impliqué dans le projet de plate-forme de capitalisation de connaissances DIMOCODE, pour la phase de test à partir de modèles développés à Ampère (pertes fer, modèles réticulés d'actionneurs, en collaboration avec l'équipe matériaux).
- G2ELab : en plus des collaborations qui ont lieu via ce GDR, collaborations bilatérales étroites pour les aspects modèles de la CEM.
- GDR Ondes : en plus de la participation régulière de plusieurs membres de l'équipe aux réunions scientifiques de différents groupes thématiques (1, 3 et 6 essentiellement), il faut noter que C. Vollaire est co-responsable du groupe thématique GT6 CEM du GDR Ondes.
- Avec l'équipe MC2 de l'INRIA-Bordeaux (composante de l'Institut de Mathématiques de Bordeaux, UMR5251) et plusieurs chercheurs de l'ICS (Institut Camille Jordan, laboratoire de mathématiques de Lyon UMR5208) : validation théorique des modèles proposés.
- Participation à l'ANR Blanc « Utilisation de nouveaux outils conceptuels pour le calcul scientifique avec application à l'électromagnétisme », avec ces mêmes chercheurs de l'ICS.
- Avec l'équipe Nachos de l'INRIA (Sophia Antipolis) : problématiques de résolution des équations de Maxwell dans des milieux hétérogènes ; prise en compte des incertitudes.

- Avec XLIM : prise en compte des incertitudes ; interaction des champs avec les cellules biologiques.

### Au niveau international

- Nos principales collaborations internationales se passent avec nos partenaires de 3 universités brésiliennes (Universités Fédérales de Minas Gerais, Belo-Horizonte et de Santa Catarina, Florianópolis ; Université de São Paulo). Ces relations, tissées au départ dans le cadre de la conférence internationale Compumag, puis de l'International Compumag Society, se sont renforcées à partir de 2000 avec 2 accords CAPES-Cofecub (1 sur l'optimisation avec l'UFMG, l'autre sur la CEM avec l'USP), qui ont permis de nombreux échanges de chercheurs permanents et de thésards, avec un riche bilan scientifique. L'ECL a également appuyé ces échanges par des invitations de professeurs. Le G2ELab (Grenoble) ayant avec les mêmes partenaires une histoire comparable, nous avons, avec l'appui du CNRS, répondu en août 2008 à l'appel d'offre du CNPq pour la création d'un Laboratoire International Associé. Notre dossier a été le seul retenu en lien avec le CNRS (3 autres l'ayant été avec l'INSERM). CE LIA (LIA Maxwell) sera officiellement créé durant l'été 2009, marquant de manière forte la reconnaissance, par le CNRS et le CNPq, de l'intensité et de la qualité des relations internationales ainsi établies.
- Nous travaillons maintenant aussi depuis 6 ans avec l'équipe de Patrick Dular, de l'Université de Liège, sur diverses questions liées à la modélisation numérique de l'électromagnétisme (8 revues, 10 Conférences, plusieurs soumissions). Cette équipe collaborant par ailleurs aussi avec G2ELab et avec l'UFSC (Brésil), elle fait indirectement partie du LIA Maxwell. L'Ecole Centrale a aussi fortement appuyé cette collaboration durant ces 4 dernières années, avec 4 mois d'invitation.

### Pertinence et originalité de l'équipe

L'équipe Modélisation a un spectre très large en électromagnétisme, allant des phénomènes BF aux phénomènes HF (de l'ordre du GHz). Cette évolution en fréquence a été due à la nécessité de développer des modèles spécifiques pour traiter des problèmes de CEM rayonnée pour les systèmes de puissance, et l'équipe est aujourd'hui une des seules à commencer à maîtriser les fréquences intermédiaires, où courants de Foucault et courants de déplacement sont présents. La grande originalité de l'équipe est aujourd'hui la modélisation en bioélectromagnétisme (dosimétrie numérique, modélisation de l'interaction champ-cellule, interface homme-machine spécifique).

Il faut noter que tous les développements de modèles prennent appui sur des manipulations expérimentales, que ce soit dans le domaine de la CEM (centre d'essai CEM, collaborations avec G2ELab et SATIE) ou dans le domaine du vivant (laboratoire de microbiologie, collaborations avec l'équipe Microsystèmes et microbiologie, XLIM, IPBS). Ces développements théoriques sont en outre généralement effectués avec d'autres équipes spécialisées (dans le cadre du LIA, ou avec l'INRIA, l'ICJ ou l'équipe de P. Dular).

### Autoévaluation : analyse SWOR

#### Forces :

- Une équipe de 10 permanents, dont plusieurs CNRS
- Spectre large en électromagnétisme
- Des compétences dans des domaines aux frontières du GE, et/ou interfaces avec d'autres domaines scientifiques, Collaborations avec des domaines scientifiques divers
- 2 axes d'applications (champ-vivant et CEM) bien reconnus.
- Collaborations internationales fortes avec le Brésil (LIA MAXWELL) et avec la Belgique (P. Dular)

#### Faiblesses :

- 3 seniors parmi les 10 permanents
- Image générale de la Modélisation : un domaine arrivé à une certaine maturité, activités de recherche sur des « niches » (ou de nouvelles applications)
- Peu d'applications actuelles en GE
- Pratiquement plus de thèse à 100 % modélisation : uniquement des thèses inter-équipes ou inter-laboratoires, nombre de thésards trop faible.
- Pas de contrat pour financer les recherches amont (principalement des contrats importants sur l'axe CEM)

- Manque de capitalisation des outils numériques développés.
- Absente dans les contrats européens

### **Opportunités :**

- Regrouper toute l'équipe sur un même site, mais en tenant compte des contraintes imposées par chaque établissement vis-à-vis des activités d'un enseignant-chercheur autres que recherche.
- Regrouper avec des activités de l'équipe EASY, autour de la conception et du dimensionnement de système

### **Risques :**

- Départ prévisible d'1 jeune CR<sup>3</sup>

## **Message du responsable d'équipe**

Notre équipe a un bon niveau de production scientifique, qui met en évidence ses nombreux partenariats : 80% de notre production est liée à des collaborations externes. Elle fait preuve de souplesse pour s'attaquer à de nouvelles problématiques, avec une capacité de réaction rapide (exemple du filtrage spatial en CEM, abordé en août 2008 dans une collaboration avec G2ELab, avec des avancées significatives publiées dès décembre ; ou du travail sur l'analyse des données métagénomiques, qui implique un CR et un IR<sup>4</sup> – spécialiste d'IHM – de l'équipe).

Cette équipe bénéficie d'une forte proportion de personnels CNRS (50%), qui permet de compenser en partie les importantes responsabilités locales ou nationales prises par plusieurs de ses membres dans l'organisation académique<sup>5</sup> (Direction du laboratoire, de l'Ecole Doctorale, fonctions de direction au CNU et au Comité National, lourdes charges administratives à l'UCB).

L'équipe souffre d'un déficit de gouvernance : elle fonctionne plus en autogestion et en sous-groupes informels variables, plus qu'en équipe cohérente. Elle a aussi un certain déficit d'image, lié à la forte implication de ses membres dans d'autres équipes (microsystèmes, matériaux, ...), et à la remarque souvent faite que la « modélisation » est partout, pas seulement dans l'équipe qui porte ce nom. Les objectifs fixés pour ce quadriennal sont néanmoins en bonne voie d'être réalisés, sauf en ce qui concerne les aspects « systèmes » des modèles, encore insuffisamment abordés, mais qui pourraient progresser progressivement en étroite relation avec l'équipe actionneurs et systèmes).

Pour le quadriennal prochain, une hypothèse de travail intéressante serait de répartir les membres de l'équipe d'une part dans une équipe de bio-ingénierie, d'autre part dans une équipe liée à la conception des systèmes, partiellement issue de l'actuelle équipe « actionneurs et systèmes ». Les recherches purement liées aux « modèles numériques » trouveraient alors leur structuration naturelle, transversale, dans le LIA Maxwell et dans le GDR SEEDS.

---

<sup>3</sup> R. Perrussel

<sup>4</sup> R. Scorretti et O. Fabrègue

<sup>5</sup> L. Nicolas est Directeur du Laboratoire et président de la section 8 du CN ; A. Nicolas dirige l'Ecole Doctorale et est président de la 63<sup>ème</sup> section du CNU. N. Burais est – entre autres – responsable de Master.

	2006	2007	2008	2009	2010
Internationale					CEM des systèmes avioniques (Contrat Européen HIRF) Hispano-Suiza, SATIE
ANR		SENSOTAG (INL) capteur chimiques télé alimentés	BIORFIMOD (Ampère) dosimétrie corps humain - ANR JC PASSEUR'06 (IC-J): calcul HP en électromagnétisme - ICJ, INRIA CEMIRBIO (XLIM) pulses nanosecondes pour électropérialisation - XLIM, IPBS, EM2C	LIA J.C. Maxwell	
Pôle de compétitivité					
FNRAE					
Santé RF					
Cluster					
ADEME					
Carnot					
DGA					
GdR					
Internationale		L. Bernard: caractérisation et modélisation des tissus biologiques L. Travassos: modélisation du CMD dans les structures en béton S. Avila: méthodes d'optimisation multimodales et multiobjectif pour l'électromagnétisme C. Poignard: modèle de cellule biologique (collaboration ICJ)			
Nationale					
Collaboration Thèse					
CIFRE					
Contrats					
Industriel					

Systèmes à fluides sous pression et robotique médicale

Gestion d'énergie

Systèmes mécatroniques et embarqués

Intégration de puissance en SiC

Méthodes et outils génériques de modélisation

Matériaux dans les systèmes électriques

Microbiologie et environnement

Electromagnétisme et vivant

## ***Fiches scientifiques***

---

- 1. EMC of embedded systems***
- 2. Interaction champ-cellule***
- 3. Dosimétrie numérique des interactions champ-vivant***
- 4. Génomique Microbienne Environnementale : adaptation et évolution***
- 5. Ingénierie écologique***
- 6. High temperature power electronics***
- 7. Electronique de puissance haute tension***
- 8. Intégration de puissance (conception, caractérisation, mise en œuvre)***
- 9. High voltage and dielectric materials***
- 10. Matériaux magnétiques***
- 11. Composants passifs et systèmes de stockage***
- 12. Commande et gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée***
- 13. Vers une meilleure gestion de l'énergie dans l'habitat***
- 14. Estimation paramétrique et capteurs logiciels***
- 15. Méthodes numériques et outils pour la modélisation électromagnétique***
- 16. Control of Fluid Power systems***
- 17. Fluid Power and power transmission systems : multi-scale and multi-physic modelling***
- 18. Outils et methods pour l'analyse structurelle, le dimensionnement et la robustesse des systèmes***
- 19. Apprentissage et assistance des gestes médico-chirurgicaux***
- 20. Sécurité de fonctionnement des systèmes : diagnostic, pronostic et commande tolérante aux fautes***



# 1. EMC of embedded Systems

*F. Morel, C. Vollaïre,*

**Abstract**—In order to efficiently reduce EMI emissions, especially common mode (CM) conducted noise emissions that are the most disturbing in any adjustable-speed drive systems, behaviour understanding and propagation path knowing of parasitic currents in the system are indispensable. In this research area we develop many modelling approaches to predict the emc behaviour of power converters. Here, we present a simple CM disturbances modelling to calculate the CM noise currents. The modelling principle is based on specific experimental characterizations and on the modelling of the complete CM circuit considered as a chain of quadripolar matrices. Each part of the system is represented by a two-port network associated in cascade by using transfer matrix [T]. The comparison between calculations and experiments in an adjustable-speed drive system confirms effectively the validity of this approach.

Others works are in progress concerning the EMC of onboard supply network fitted with many power converters, the modelling of CM sources of perturbations coming from power converters in a predictive way ... At this time, these works are less mature than that presented here.

## CONTEXT

This research is carrying out in a collaborative context implying three laboratories (Ampère, G2Elab and Satie). All the students working in this area are managed by many researchers of these three labs. This research is supported by industrial partners (Hispano-Suiza, Schneider, Valeo) through some projects (European's project HIRF, O2M ...).

## SCIENTIFIC CONTEXT

In recent years, the switching frequency of PWM inverters has strikingly increased owing to the high progress of electric power and semiconductor elements. This has brought significant improvements in controllability of voltage, current, and torque to adjustable-speed motor drive systems [1] widely used. Nevertheless, it causes a number of major EMI problems in electrical systems [hal-00141455], and in aircraft. These impediments are such as high-frequency leakage currents flowing to the ground through capacitive couplings, deterioration of motor winding insulation, shaft voltage and bearing current in motor, and radiation of power cables. Consequently, it is necessary to know the different propagation path of the CM noise emissions, which are the most disturbing in the system, in order to apply an appropriate method to minimize or eliminate them.

In aeronautics, these problems are extremely important because for the new generation "more electric" airplane, the pneumatic and hydraulic machines will be replaced by electrical actuators (steering deflection, braking systems, ...) in order to reduce the costs as well as the weight of the embedded systems. The use of electric materials in these systems, which has to take into account the constraints of aeronautical environments: vibrations, temperature, weight, ..., imposes reliability constraints and very strong restrictions in term of EMC. CM conducted emissions produced by such systems can generate radiated emissions that could create malfunctions in sensitive avionic surrounding equipments.

Modelling of such system is generally fairly difficult because of its complexity. Many models have been created in

a circuit type simulation environment [hal-00197089], usually used to design AC motor drive systems. To validate this kind of complex system in EMI analysis, simulated temporal signals have to be converted to spectral signals using Fast Fourier Transform (FFT) command in the simulators. The FFT process could take much computing time if the frequency results are expected on a large frequency band because of the time step required. In addition, the simulation in time domain could be impossible if the considered system is too complex. Thus, the approach proposed herein [hal-00141455] is an interesting solution to avoid these previously stated restrictions because it provides directly the results in frequency domain. Besides, this attractive modelling, which is based on specific experimental measurements of the different parts of the system, is efficient and simple. The modelling principle consists of representing the CM circuit by a chain of two-port networks corresponding to each component of the system. Measuring of equivalent CM impedances of each element and CM voltage generated by PWM inverter is the essential step to make this two-port network model available.

## EXPERIMENTAL BENCH

The experimental bench of the studied system is constituted of a front-end, three-phase transformer (400 V, 50 Hz, 4 kVA), a three-phase LISN, a three-phase diode rectifier, a three-phase IGBT inverter, an asynchronous induction motor (400 V, 3 kW, nominal speed: 1500 rpm), and shielded cables (four conductors, section = 5mm<sup>2</sup>, shielding braid). The cable feeding the motor is a main element to transport electromagnetic disturbances to the motor and other parts of the system. Fig. 1 shows the schematic representation of the studied system. This arrangement has been chosen in order to be similar to existing aeronautic equipments.

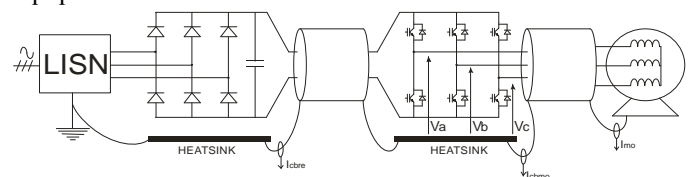


Fig. 1. Schematic representation of the experimental bench

The complete system is situated on a 2-m<sup>2</sup> copper plane, excluding a dc generator loaded by a bulk resistor used as the load of the system and the motor that are placed on a thick PVC plate to insulate them from the ground. This ensures that all parasitic CM current flowing through the motor only returns to the CM source via the cable shield, but not via ground plane. Every part of the system can be separately connected to ground in order to independently estimate or measure the parasitic CM current issued from each part of the entire system.

## MODELLING

The model is represented by a chain of two-port networks (Fig. 2) associated with impedance matrix [Z], which is next transformed into transfer matrix [T] in order to compute



equivalent matrix of the consecutive two-port networks in cascade. The coefficient values of impedance matrices are obtained by measurements thanks to an Impedance Analyzer HP 4194A. The CM voltage ( $V_{CM}$ ) is also experimentally determined using a Spectrum Analyzer HP 4195A.

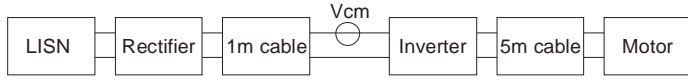


FIG. 2. Modelling principle: the system is represented by a chain of two-port networks in cascade

#### A. CM voltage ( $V_{cm}$ ) determination

CM voltage generated by the inverter is defined by (1).

$$V_{cm} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (1)$$

$V_a$ ,  $V_b$  and  $V_c$  are the output voltages of leg of the inverter referenced to ground. The  $V_{CM}$  spectrum which is experimentally determined by an acquisition chain.

#### A. Equivalent CM impedance determination

To measure equivalent CM impedances (coefficients of matrix  $[Z]$ ;  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_{21}$ , and  $Z_{22}$ ), the input and the output of each component have to be short-circuited, as shown in Fig. 3. Then, measurement of these impedances is realized between the conductors in shorted-circuit and the ground of the system.

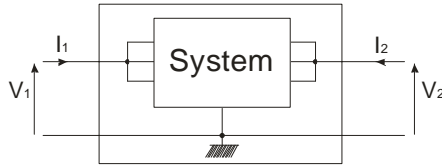


Fig. 3. Configuration to determine the coefficients of the matrix  $[Z]$  at CM point of view

The coefficients of matrix  $[Z]$  are defined by (2):

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} = \left( \frac{V_1}{I_1} \right)_{I_2=0} & Z_{12} = \left( \frac{V_1}{I_2} \right)_{I_1=0} \\ Z_{21} = \left( \frac{V_2}{I_1} \right)_{I_2=0} & Z_{22} = \left( \frac{V_2}{I_2} \right)_{I_1=0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$Z_{11}$  and  $Z_{22}$  are traditionally measured by HP 4194A, but  $Z_{12}$  and  $Z_{21}$  need to be characterized by another method. The last two coefficients, which are equivalent in our study because the components are passive, will be determined by short-circuiting first the output of the measured sub-system ( $V_2 = 0$ ). The impedance noted  $Z_{scm}$  is measured at the input between the conductors and the ground. Then, by using the relations (3) and (4),  $Z_{12}$  and  $Z_{21}$  can be determined (5).

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (3)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (4)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \sqrt{Z_{22} \cdot (Z_{11} - Z_{scm})} \quad (5)$$

#### B. Association of two two-port networks in cascade

To easily associate two two-port networks in cascade, matrix  $[T]$  is employed. The equivalent matrix of two two-port networks  $[T_{eq}]$  is obtained by doing the matrix multiplication as presented in (6).

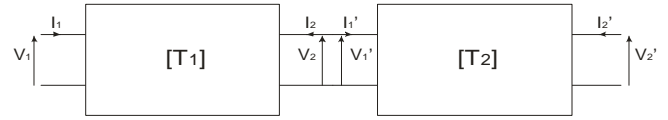


Fig. 3. Representation of two two-port networks in cascade

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = [T_{eq}] \begin{bmatrix} V_2' \\ -I_2' \end{bmatrix} \text{ where } [T_{eq}] = [T_1][T_2] \quad (6)$$

Note that the order of the multiplication has to be respected because the matrix multiplication is not commutative.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

The numerical simulation of CM currents in the cable feeding the motor and in the motor are compared to the measured ones. The figure 7 shows that our model works well up to 10MHz. Beyond, some problems exist, such as the spectrum analyzer signal noise ratio, the measurement accuracy, and etc.

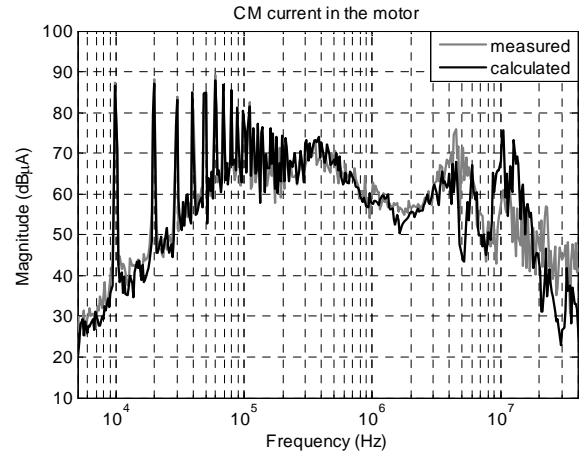


Fig. 7. CM current in the motor

This approach can be also used efficiently to optimize EMI filters or the means of EMI reduction because it enables us to calculate the CM current at every node of the system. These works continue by increasing the frequency domain of validity of the model and by trying to take into account the DM in the same way (multipolar approach) to have a complete model taking into account the transfer of modes.

## 2. Interaction Champ-Cellule

F. Buret, N. Burais, N. Haddour, L. Nicolas, R. Perrussel, M. Robin-Frénéa, R. Scoretti, D. Voyet

**Abstract** — L'interaction champ-cellule constitue un des pivots des recherches engagées dans le domaine plus large de l'interaction champ/vivant. Elle est supportée par un effort important de mise en place de moyens expérimentaux ainsi que de développement de modèles numériques adaptés.

### INTRODUCTION

La maîtrise des effets biologiques sur les organismes vivants des champs électromagnétiques constitue un enjeu important dans le domaine du Génie Electrique. D'un côté, le développement rapide des technologies utilisant l'électricité en tant que vecteur énergétique ou en temps que vecteur de l'information conduit à un certain nombre d'interrogations concernant la santé publique pouvant avoir un impact significatif sur leur acceptabilité sociétale. D'un autre côté les champs électromagnétiques sont à la base de nombreuses applications de diagnostic ou thérapeutiques existantes ou en développement.

En s'attachant à comprendre, de la manière la plus fine possible, les effets des champs électromagnétiques sur une cellule élémentaire, l'activité « interaction champs-cellule » s'inscrit dans cette problématique. Elle constitue en effet une première étape indispensable à la maîtrise des effets des champs au niveau cellulaire lorsque ceux-ci sont appliqués au niveau des tissus voire de l'organisme tout entier. Elle constitue également une activité pouvant déboucher à court terme sur une large gamme d'applications touchant au secteur de la santé et de la bioingénierie. En effet, les champs électromagnétiques permettent la manipulation, le tri cellulaire, l'électrofusion, l'électroporation et même les des manipulations génétiques lorsque les cellules étudiées correspondent à des organismes unicellulaires comme les bactéries.

L'étude de l'interaction champ-cellule repose essentiellement :

- sur la mise en place de moyens expérimentaux permettant de soumettre des cellules élémentaires ou des modèles de cellules à des champs électromagnétiques.
- sur le développement de modèles électromagnétiques de cellule suffisamment précis pour le contexte d'utilisation visé.

### MOYENS EXPERIMENTAUX

#### A. Banc de diélectrophorèse.

Le dispositif développé depuis maintenant trois ans met en oeuvre essentiellement la diélectrophorèse en rotation (r-DEP) obtenue par l'application d'un champ électrique tournant bien qu'il puisse également être utilisé pour de la diélectrophorèse conventionnelle (c-DEP). Le cœur du dispositif est un microsystème de 4 électrodes à profil parabolique qui permettent de créer un champ tournant uniforme dans une zone d'une centaine de micromètres de diamètre. Ce microsystème est complété par les générateurs

HF (qqes Hz...80 MHz), le microscope couplé à une caméra et le poste informatique de pilotage (Fig. 1).

Il est possible d'acquérir de manière automatique, par traitement d'image, les spectres diélectrophorétiques (Fig. 2) qui sont déduits des mesures des vitesses de rotation des cellules en fonction de la fréquence du champ tournant. A notre connaissance c'est le seul banc de ce type au niveau national.

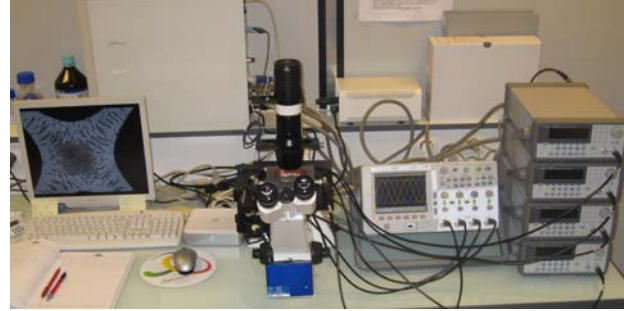


Fig.1. Banc d'acquisition des spectres diélectrophorétiques

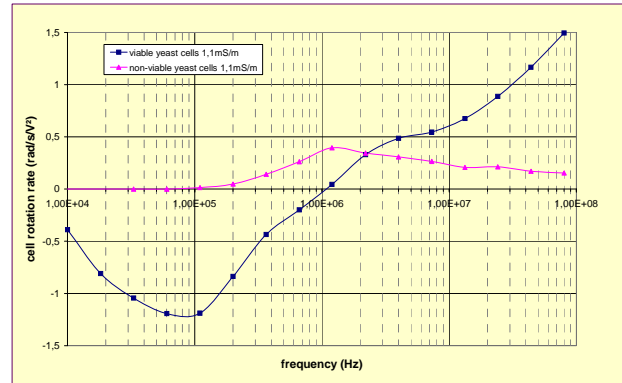


Fig.2. Spectre diélectrophorétique

La vitesse de rotation  $\Omega(f)$  d'une cellule baignant dans un milieu est caractéristique des propriétés diélectriques (permittivité, résistivité) des différents constituants de la cellule. Dans le cas d'une cellule, supposée sphérique modélisée par deux régions, cette vitesse est donnée par l'équation 1 :

$$\Omega(f) = -\chi \operatorname{Im} \left( \frac{\varepsilon_{eq}^* - (\varepsilon_0 \varepsilon_{rb} + \frac{\sigma_b}{2i\pi f})}{\varepsilon_{eq}^* + 2(\varepsilon_0 \varepsilon_{rb} + \frac{\sigma_b}{2i\pi f})} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq}^* = \frac{(C_m + \frac{G_m}{2i\pi f})R(\varepsilon_0 \varepsilon_{rc} + \frac{\sigma_c}{2i\pi f})}{(C_m + \frac{G_m}{2i\pi f})R + (\varepsilon_0 \varepsilon_{rc} + \frac{\sigma_c}{2i\pi f})} \quad (2)$$

avec

- ♦  $G_m$  et  $C_m$  conductance et capacité spécifique de la membrane.
- ♦  $\sigma_c$  et  $\varepsilon_{rc}$  conductivité et permittivité du cytoplasme,
- ♦  $\sigma_b$  et  $\varepsilon_b$  conductivité et permittivité du milieu,  $R$  rayon de la cellule et  $\chi$  un coefficient dépendant essentiellement de l'intensité du champ et de la viscosité.

#### B. Elaboration de liposome

Nous avons également développé un banc d'électroformation de liposomes qui nous permet d'obtenir des vésicules de tailles comprises entre 10 et 100µm. Les tailles dans la

gamme 200 nm - 10µm sont obtenues par une technique classique d'extrusion. Le contenu de la vésicule ainsi que la constitution de la membrane sont maîtrisés en termes de propriétés physico-chimiques et les liposomes ainsi constitués peuvent être également fonctionnalisés dans un but d'observation et/ou de manipulation. Ils ont vocation à fournir des modèles de cellule biologique parfaitement calibrés. Ils nous permettent dans un premier temps de nous affranchir de la forte variabilité des paramètres inhérente aux systèmes biologiques et de tester des techniques de manipulation.

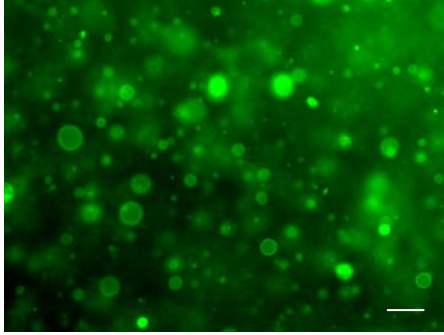


Fig.3. Liposomes fluorescents électroformés à partir d'un mélange DOPC/DOPC-NBD observés par microscopie à fluorescence (barre=50µm)

#### EXTRACTION DE PARAMETRES

Une des utilisations du banc d'acquisition des spectres diélectrophorétiques est la caractérisation diélectrique de bioparticules. Dans le cas de cellules l'extraction de paramètres permettant de renseigner un modèle électromagnétique (Eq. 1) est rendue plus compliquée par la variabilité des paramètres que nous voulons estimer. La sensibilité du spectre en fonction des paramètres diélectriques varie en fonction de la fréquence (Fig. 3).

Classiquement l'extraction des paramètres est réalisée par

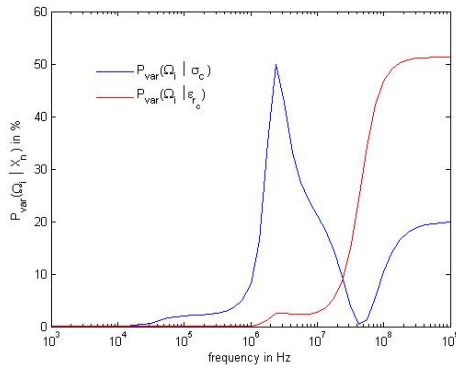


Fig.3. Variance partielle par rapport à  $\sigma_c$  et  $\epsilon_{rc}$ .

une méthode basée sur la minimisation de l'erreur (modèle-mesure) sur l'ensemble du spectre. La méthode élaborée dans le cadre de ces travaux consiste à accorder un poids plus important, pour un paramètre donné, à la zone de fréquence où le spectre présente la plus forte sensibilité pour le paramètre visé. Le tableau 1 illustre l'amélioration de la précision qui en résulte.

TABLE I

Paramètres	Méth. classique	Méth. avec pondération
$\sigma_c$	5 %	3 %
$\epsilon_{rc}$	15 %	7 %
$G_m$	35 %	20 %
$C_m$	7%	3 %

#### MODÉLISATION

En termes de modélisation diélectrique des cellules, un effort particulier a été porté sur la modélisation de la membrane. La faible épaisseur ( $\delta$ ) de celle-ci pose un problème évident de maillage et nous avons choisi de développer des conditions d'interface (Eq. 3 – modèle du premier ordre) permettant de prendre en compte l'influence de la membrane. Eq.3 montre un système particulier de conditions où la membrane est décrite comme une résistance de contact. La première équation traduit la liaison entre le potentiel transmembranaire ( $V_{TMP}$ ) et la composante normale du courant sur la surface externe de la membrane. La seconde impose la continuité de cette composante au travers de la membrane.

$$(\epsilon_m \frac{\partial}{\partial t} + \sigma_m) V_{TMP} = \delta (\epsilon_b \frac{\partial}{\partial t} + \sigma_b) \frac{\partial V}{\partial n_b} \quad (3)$$

$$(\epsilon_b \frac{\partial}{\partial t} + \sigma_b) \frac{\partial V}{\partial n_b} + (\epsilon_c \frac{\partial}{\partial t} + \sigma_c) \frac{\partial V}{\partial n_c} = 0$$

Fig.4 montre l'évolution de l'erreur relative sur  $V_{TMP}$  lors de l'application d'une impulsion de champ électrique entre la situation où la membrane est décrite par un maillage volumique et celle où elle est décrite par les Eq.3.

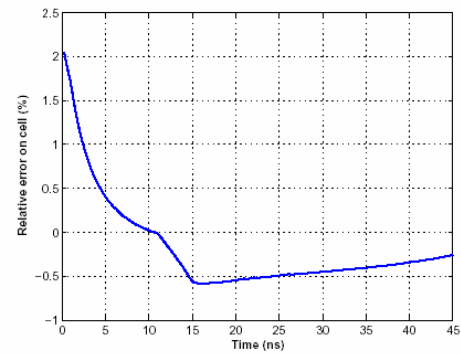


Fig.4. Erreur relative sur  $V_{TMP}$

#### PERSPECTIVES

Les perspectives de développement de cette activité se déclinent sous deux aspects expérimental (création de dispositifs permettant la microfusion et la microélectroporation de cellules et exploitation de la possibilité d'internaliser des nanoparticules magnétiques fonctionnalisées à l'intérieur des cellules) et de modélisation (développement de modèles de cellules les plus réalistes possibles ; en particulier la modélisation de la membrane est particulièrement critique ; une voie que l'on veut exploiter est le changement d'échelle entre les résultats obtenus en dynamique moléculaire à l'échelle d'une portion réduite de membrane et la membrane complète).

#### REFERENCES

<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00358846/fr>  
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00369592/fr>  
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00320016/fr>  
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00359312/fr>  
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00124110/fr/>

### 3. Dosimétrie numérique des interactions champ-vivant

N. Burais, L. Nicolas, R. Perrussel, R. Scorretti, N. Siauve, D. Voyer

**Résumé** — La dosimétrie des champs électromagnétiques consiste à quantifier ces champs dans les systèmes vivants (bactéries, animal, homme) afin d'étudier les interactions champs/vivant, que ce soit pour appréhender le risque associé à une telle exposition, ou pour tirer profit des effets biologiques qui en dérivent. Parmi les difficultés majeures citons l'obtention de fantômes de calcul de plus en plus précis, la détermination des paramètres électriques des tissus et la validation expérimentale.

#### INTRODUCTION

L'interaction champs électromagnétiques / vivant vise à quantifier les champs à l'intérieur de « systèmes vivants », tant au niveau macroscopique (applications : dosimétrie numérique pour la réglementation et la sécurité du travail, soin du cancer par hyperthermie) qu'à l'échelle de la cellule (application : étude de l'électroporation de cellules).

#### DIFFICULTES SCIENTIFIQUES

Les principales difficultés scientifiques dans ce vaste domaine sont :

- *L'obtention rapide de fantômes de calcul à partir d'images issues de systèmes d'imagerie médicale (IRM ou scanner)* : bien que dans les dernières années le nombre de fantômes « génériques » disponibles n'ait cessé d'augmenter [1,2,3,4,5], l'application des outils de dosimétrie numérique dans un cadre clinique requiert nécessairement d'effectuer les calculs sur un fantôme particulier adapté au patient [8]. En outre, les fantômes disponibles sont généralement dans une position figée : or, d'autres configurations d'étude seraient parfois plus pertinentes. Des travaux récents existent dans ce domaine [6], mais ils restent très limités.

- *La validation expérimentale des valeurs obtenues par dosimétrie numérique* : ce problème reste un point bloquant depuis des nombreuses années [10]. Au début des années 2000, des méthodes d'imagerie de courants par résonance magnétique ont donné quelque résultats sur des fantômes en gel d'agar, ou même *in vivo* chez l'animal dans des conditions très particulières [12]. Par ailleurs, ces méthodes permettent aussi d'estimer la conductivité des différents tissus *in vivo*. Cependant, il n'existe pas aujourd'hui d'études qui visent spécifiquement à quantifier les champs électriques dans le corps humain à la fois par voie numérique et expérimentale.

- *Calcul de champs à des échelles intermédiaires* : alors que des nombreux travaux sur la dosimétrie des champs à l'échelle macroscopique existent, on ne trouve quasiment aucune donnée concernant la dosimétrie des champs à l'échelle d'un organe ou d'un tissu [9]. Cette lacune est d'autant plus préjudiciable, que de nombreux effets biologiques des champs électromagnétiques ne peuvent s'expliquer qu'en étudiant leur mécanisme à ces échelles (notamment les phénomènes inflammatoire et d'adhésion cellulaire). La maîtrise des champs électromagnétiques à ces échelles pourrait permettre de mettre en relation des grandeurs macroscopiques mesurables avec des effets biologiques. Remarquons que des problèmes d'échelle

similaires se rencontrent également lorsque l'on vise à étudier les effets des champs électromagnétiques sur des communautés bactériennes. Notons aussi que la modélisation des champs à l'échelle du tissu pourrait permettre d'obtenir comme « sous-produit » une meilleure estimation des caractéristiques électriques (permittivité, perméabilité) des différents matériaux biologiques [11], qui jusqu'à présent ne sont accessibles que sur la base de mesures macroscopiques, très imprécises au très basses fréquences.

- *L'utilisation de modèles non-linéaires pertinents pour la prise en compte de certains phénomènes à l'échelle de la cellule* (électroporation particulièrement) : suivant le type de pulses électriques utilisé (nano-pulses notamment), les modèles classiques [13] peuvent ne plus être valides.

#### POSITIONNEMENT

Au sein du laboratoire, la dosimétrie numérique compte maintenant parmi les activités bien établies. Pour l'instant, cette activité est menée majoritairement par l'équipe « Modélisation », mais des points de contact existent avec l'équipe « Micro-systèmes et microbiologie » (électrorotation de cellules) et « Actionneurs et systèmes » (problématique liée aux fantômes de calcul), ce qui contribue au caractère multidisciplinaire de cette activité.

Au niveau national, le laboratoire Ampère est parmi les leaders dans le domaine de la dosimétrie numérique des champs électromagnétiques. Cette position est confirmée par des collaborations avec d'autres organismes de recherche (Xlim, Lamel, Cethil, Créatis, Inria...) et avec des industriels (RTE).

Par contre, au niveau international cette activité n'est pas encore suffisamment reconnue. Ceci est dû en partie à sa relative jeunesse, mais aussi aux problèmes liés à l'obtention de fantômes de calcul de haute résolution. Ce dernier point jusqu'à présent a constitué un frein pour le développement de cette activité.

Les enjeux sociétaux liés à cette activité portent essentiellement sur deux points : la nécessité d'établir de manière précise la conformité de systèmes électriques par rapport à la future réglementation qui est censée entrer en vigueur en 2012, et le développement d'applications biomédicales (soin de cancers par hyperthermie ou par chimio-électrothérapie, traitement de la douleur, réparation de fractures osseuses...).

#### ACTIONS PASSES ET EN PERSPECTIVE

Les actions menées jusqu'à présent se sont limitées à l'aspect purement numérique du problème, avec notamment le développement de formulations adaptées (= tirant profit des spécificités des tissus vivants) en basse et moyenne fréquence. Bien que des interrogations demeurent dans la bande de fréquences intermédiaires (100 kHz – 1 MHz), les formulations paraissent maintenant relativement bien établies en ce qui concerne la dosimétrie à l'échelle macroscopique. Il est important de mettre au point des méthodes d'estimation de l'erreur ; une voie envisagée pour atteindre cet objectif passe par le développement et/ou l'utilisation conjointe de nouvelles formulations.



A l'échelle de la cellule, des calculs ont été menés sur des « cellules inertes » (pas de déformation mécanique, pas de non-linéarités dues à des phénomènes bio-physiques) avec des formulations adaptées aux spécificités du phénomène étudié telles que l'axisymétrie des géométries ou la présence de membranes minces.

Dans le futur, cette activité va se poursuivre afin d'apporter des réponses aux interrogations scientifiques évoquées précédemment. En particulier, les travaux actuellement en cours sur la génération de maillages adaptés seront poursuivis, et devraient permettre d'obtenir des résultats d'une précision comparable à celle atteignable par d'autres méthodes (notamment TDFD, SPFD, et FIT) – mais avec un coût de calcul que l'on espère être beaucoup plus faible<sup>2</sup>.

Les maillages obtenus vont générer des problèmes de très grande taille, qui vont nécessairement impliquer l'adoption de techniques de calcul parallèle et de décomposition de domaine, qui ne se justifiaient pas jusqu'à présent, du fait de la taille relativement petite des maillages disponibles. Parallèlement à l'amélioration des méthodes de calcul basées sur les éléments finis, nous allons explorer la possibilité d'adopter des méthodes différentes, et notamment des méthodes d'intégrales de frontière qui pourraient s'avérer très intéressantes dans les cas d'une utilisation conjointe avec des fantômes de calcul récents [2,7] qui sont basés sur une représentation de la géométrie du corps humain par surfaces gauches.

La validation expérimentale et le calcul de champs à des échelles intermédiaires requièrent des compétences et des moyens expérimentaux qui n'existent pas au sein de l'équipe : pour combler cette lacune il faudra mettre en place des collaborations avec des spécialistes des disciplines concernées (imagerie par RM, médecine, biologie animale...). L'intégration de l'équipe « Microsystèmes et microbiologie » au sein du laboratoire a maintenant atteint un stade de maturation suffisant, et devrait donc permettre d'aborder le thème des effets biologiques des champs sur des modèles bactériens. La nouvelle restructuration des équipes va dans ce sens. Ceci pourrait permettre à terme de passer à des études sur des modèles plus proches de l'humain (microorganismes eucaryotes, animaux).

#### REFERENCES

- [1] S. Kühn, W. Jennings, A. Christ, N. Kuster, "Assessment of induced radio-frequency electromagnetic fields in various anatomical human body models", *Phys. Med. Biol.* **54** (2009) 87-890.
- [2] X.G. Xu, V. Tarantenko, J. Zhang, C. Shi, "A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods – RPI-P3, -P6 and -P9", *Phys. Med. Biol.* **52** (2007) 7023-7044.
- [3] C.H. Kim, S.H. Choi, J.H. Jeong, C. Lee, M.S. Chung, "HDRK-Man: a whole-body voxel model based on high-resolution color slices images of a Korean adult male cadaver", *Phys. Med. Biol.* **53** (2008) 4093-4106.
- [4] S.X. Zhang, P.A. Heng, Z.J. Liu, L.W. Tan, M.G. Qiu, Q.Y. Li, R.X. Liao, K. Li, G.Y. Cui, Y.L. Guo, X.P. Yang, G.J. Liu, J.L. Shan, J.J. Liu, W.G. Zhang, X.H. Chen, J.H. Chen, J. Wang, W. Chen, M. Lu, J. You, X.L. Pang, H. Xiao, Y.M. Xie, J.C.Y. Cheng, "The Chinese Visible Human (CVH)

*datasets incorporate technical and imaging advances on earlier digital humans*", *J. Anat.* (2004) **204**, pp. 165-173.

[5] P. Dimbylow, "Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50Hz", *Phys. Med. Biol.* **51** (2006) 2383-2394.

[6] T. Nagaoka, S. Watanabe, "Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry", *Phys. Med. Biol.* **53** (2008) 7047-7061.

[7] C. Lee, D. Lodwick, D. Hasenauer, J.L. Williams, C. Lee, W.E. Bolch, "Hybrid computational phantoms of the male and female newborn patient: NURBS-based whole body models", *Phys. Med. Biol.* **52** (2007) 3309-3333.

[8] S. Whalen, C. Lee, J.L. Williams, W.E. Bolch, "Anthropometric approach and their uncertainties to assigning computational phantoms to individual patients in pediatric dosimetry studies", *Phys. Med. Biol.* **53** (2008) 453-471.

[9] R.S. Chiu, M.A. Stuchly, "Electrical fields in bone marrow substructures at power-line frequencies", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* vol. 52, no. 6 (June 2005), 1103-1108.

[10] D.L. Miller, J.A. Creim, "Comparison of cardiac and 60 Hz magnetically induced electric fields measured in anesthetized rats", *Bioelectromagnetics* **18**:317-323 (1997).

[11] S.W. Smye, C.J. Evans, M.P. Robinson, B.D. Sleeman, "Modelling the electrical properties of tissue as a porous medium", *Phys. Med. Biol.* **52** (2007) 7007-7022.

[12] M.L.G. Joy, V.P. Lebedev, J.S. Gati, "Imaging of current density and current pathways in rabbit brain during transcranial electrostimulation", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 46, no. 9, September 1999, 1139-1149.

[13] J.C. Neu and W. Krassowska, "Asymptotic model of electroporation", *Physical Review E*, vol. 59, no. 3, March 1999.

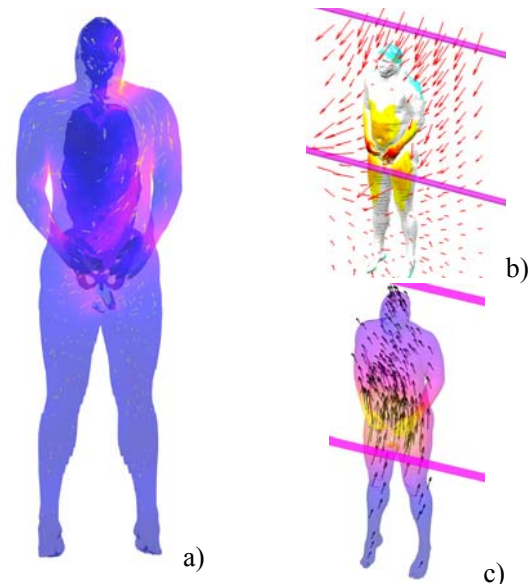


Fig.1: a : courants induits dans le corps humain par une ligne triphasée. b : champ source – c : induction magnétique B

<sup>2</sup> Dans le cas des techniques numériques citées plus en haut (TDFD, PSFD, FIT) on obtient des systèmes linéaires avec un nombre d'inconnues extrêmement important (de l'ordre de  $10^7$  degrés de liberté). Avec les Eléments Finis nous espérons « déplacer » la difficulté de la résolution d'un tel système linéaire, vers l'obtention d'un fantôme de calcul plus sophistiqué – ce qui nous permettrait en contrepartie de réduire le nombre d'inconnues du système linéaire.

## 4. Génomique Microbienne Environnementale: Adaptation et Evolution.

S. Cecillon, L. Franqueville, M. Lacroix, E. Navarro, P. Simonet, T.M. Vogel

**Abstract—Understanding how micro-organisms adapt and evolve in the environment requires biological models for the mechanisms involved such as gene transfer and genomic rearrangement. The models used here help this research team explore the full extent of microbial adaptation and evolution.**

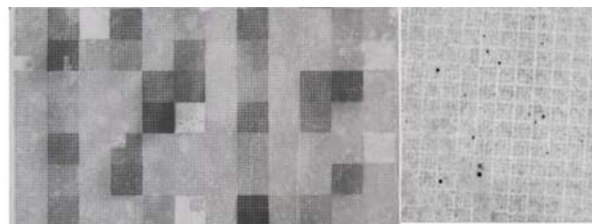
### I. INTRODUCTION:

Les sols de notre planète se caractérisent par une très grande diversité et pour chacun d'entre eux par la complexité et l'hétérogénéité de sa structure physique et de sa composition chimique. Cette diversité abiotique se conjugue à celle des microorganismes, le sol étant reconnu comme le plus grand réservoir de la diversité tant des procaryotes que des microorganismes eucaryotiques. Nos objectifs sont d'étudier par quels mécanismes la communauté bactérienne d'un sol peut évoluer et s'adapter à son environnement tellurique. L'originalité de notre approche est de prendre en compte l'influence des facteurs biotiques et édaphiques qui ensemble vont participer à la régulation des mécanismes adaptatifs bactériens. Les études sur les bactéries du sol sont toutefois confrontées à plusieurs difficultés liées à la taille microscopique des organismes concernés, à la complexité de la matrice tellurique, au nombre très élevé de cellules bactériennes, à l'extrême diversité tant infra qu'interspécifique, au flou même de la notion d'espèce bactérienne et au caractère non cultivable de la très grande majorité des bactéries du sol [1].

### II. INVENTAIRE POPULATIONNEL ET FONCTIONNEL DE LA COMMUNAUTE BACTERIENNE PAR UNE APPROCHE METAGENOMIQUE:

Une des premières étapes pour répondre aux questions d'évolution et d'adaptation était d'inventorier la diversité bactérienne tant en termes populationnels (identification des bactéries) que fonctionnels (gènes de fonction). Notre équipe s'est fortement investie pour développer deux types de méthodes (directes et indirectes) d'extraction de l'ADN des cellules bactériennes de l'environnement sans étape de culture *in vitro* [2, 3]. L'exploitation de l'ADN extrait permet de définir un instantané de la composition d'une communauté bactérienne quand, ciblant par PCR un gène marqueur comme celui qui produit la petite sous unité des ARN ribosomiques les produits sont hybridés sur des lames comprenant plusieurs milliers de signatures moléculaires de groupes bactériens identifiés à différents niveaux taxonomiques [4]. L'analyse des lames (puces à ADN taxonomiques ou phylochips) hybridées avec l'ADN extrait de sols soumis à différentes situations environnementales permet ainsi de déterminer l'évolution populationnelle de la communauté, de définir quels groupes taxonomiques sont les plus affectés positivement ou négativement. Appliquées à des sols soumis à des concentrations élevées en éléments toxiques, comme lors de contaminations d'origine anthropique par des pesticides chlorés ou naturellement comme dans le cas des environnements riches en nickel en Nouvelle Calédonie ces technologies permettent de définir des bio-indicateurs de l'état perturbé comme par exemple peuvent l'être les actinobactéries dans les sols néo-calédoniens perturbés.

L'approche populationnelle n'est cependant que la première étape du décryptage des mécanismes adaptatifs d'une communauté bactérienne. La seconde étape, plus mécanistique, concerne son potentiel fonctionnel en termes de gènes susceptibles d'être exprimés *in situ* qui vont contribuer à la valeur sélective (fitness) de la population concernée. Les stratégies pour ces études fonctionnelles peuvent faire appel au clonage de l'ADN environnemental pour créer des banques d'ADN métagénomique qui seront ensuite criblées par une technologie d'hybridation de colonies sur membranes pour rechercher les gènes d'intérêt [5] (gènes impliqués dans le processus de dénitrification par exemple).



Hybridation sur membranes des clones de la banque d'ADN métagénomique du sol.

- A. Grâce à la robotisation, chaque clone de la banque peut être déposé sur la membrane, les cellules s'y développent, sont lysées et les membranes hybridées. Cette membrane de référence montre la reproductibilité, la sensibilité et la spécificité de la technique, chaque clone ayant été déposé 100 fois (carré).
- B. La technique d'hybridation sur membrane a été appliquée pour détecter des inserts contenant des gènes d'intérêt. Les clones positifs peuvent être aisément détectés avant que leur ADN soit analysé par les techniques conventionnelles de biologie moléculaire.

L'analyse des inserts des clones répondant positivement à l'hybridation permet alors de détecter de nouveaux gènes, en particulier ceux appartenant à des bactéries non cultivables, de définir leur environnement génétique ce qui donne des indications sur la façon dont ils peuvent être transcrits, régulés, sur leurs possibilités de dissémination [hal-00368298].

En complément à ce criblage moléculaire, la banque de clones recombinants peut aussi être criblée phénotypiquement quand sont ciblés des gènes qui, exprimés dans leur nouvel hôte vont assurer sa croissance spécifique en présence de l'agent de sélection (gènes de résistance à des antibiotiques ou à des métaux lourds) Cette stratégie a par exemple permis de détecter plusieurs nouveaux déterminants génétiques de la résistance au nickel, de montrer l'originalité de l'environnement génétique et d'émettre des hypothèses concernant leur implication dans le pouvoir adaptatif de l'hôte naturel dont ils sont issus. Ces études fonctionnelles sont maintenant accessibles par le séquençage direct de l'ADN extrait du sol (pyroséquençage), nos travaux récents montrant qu'approches par séquençage direct et criblage de banques sont complémentaires [hal-00368291].

### III. ROLE DU TRANSFERT HORIZONTAL DE GENES COMME MECANISME BACTERIEN D'ADAPTATION ET D'EVOLUTION.

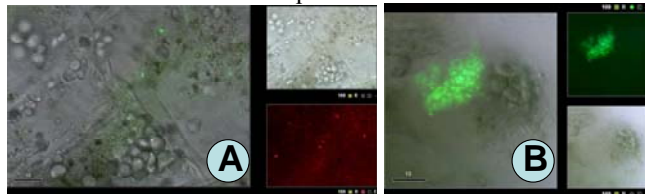
Le séquençage complet de plusieurs centaines de génomes bactériens a révélé le rôle fondamental joué par le transfert horizontal de gènes (THG) aboutissant à la structure des génomes tels qu'on peut les observer aujourd'hui avec parfois plus de 30% des gènes d'origine étrangère (Nakamura et al., 2004). Le rôle majeur du THG dans l'adaptation des bactéries est confirmé par nos propres résultats qui montrent comment le transfert d'informations génétiques entre bactéries peut permettre à une bactérie d'acquérir de nouvelles fonctions qui jusque là leur étaient inutiles. C'est le

cas des enzymes pouvant dégrader les nouvelles structures chimiques riches en atomes de chlore (composés xénobiotiques) que l'homme utilise comme pesticides mais qui n'existent pas à l'état naturel. L'analyse bioinformatique du gène codant une de ces enzymes provenant d'une des rares bactéries pouvant dégrader un de ces pesticides montre une structure mosaïque faite de plusieurs fragments exogènes d'ADN [6]. Seul un fort brassage génétique entre bactéries a pu aboutir au façonnement de ce nouveau gène fonctionnel dont l'expression a accru la valeur adaptative de l'hôte bactérien confronté au polluant alors que de telles combinaisons géniques n'étaient jamais fixées dans une population bactérienne avant que ce composé chimique ait commencé à être répandu dans l'environnement dans les années 1950.

Nos objectifs sont de comprendre comment peuvent être régulés les échanges de gènes entre bactéries dans l'environnement terrestre, par les bactéries elles-mêmes mais aussi par les facteurs du milieu.

On pouvait en effet trouver une certaine contradiction entre les données de génomique qui montrent l'importance des flux de gènes y compris entre bactéries phylétiquement éloignées et d'autres données de la littérature décrivant des travaux expérimentaux en microcosmes de sol où les échanges de gènes entre bactéries ne se réalisent dans le meilleur des cas qu'à des fréquences extrêmement faibles. Ces conclusions nous ont conduits à rechercher si le transfert de gènes *in situ* était effectivement du aux seuls mécanismes répertoriés et étudiés au laboratoire et s'il existait des sites plus favorables au THG que le sol nu.

Rappelons d'abord nos travaux sur l'impact de l'injection de courant électrique dans le sol lors de la décharge de foudre qui pourrait entraîner l'électro-transformation naturelle des bactéries dans des volumes de sol de plusieurs centaines de m<sup>3</sup> [hal-00140690]. Le fait que parmi ces bactéries du sol, certaines se caractérisent par un potentiel d'électro-compétence extrêmement élevé confirme que les mécanismes du THG sont à rechercher bien au-delà de ceux liés à un état physiologique actif des bactéries et qui impliqueraient que des éléments génétiques mobiles comme des plasmides [hal-00140812]. Très clairement, le brassage génétique dépend aussi des conditions abiotiques du milieu.



**Visualisation des transferts horizontaux de gènes entre plantes transgéniques et bactéries *in planta*.** L'acquisition du transgène par les cellules d'*A. baylii* BD413 (DPaadA::gfp) se développant sur les tissus de tabac transplastomique (aadA) conduit à la restauration de l'activité du promoteur et l'expression de la gfp visualisée en microscopie à épifluorescence (barre = 10μm).

D'autres résultats confirment que l'environnement terrestre comporte des sites où les échanges de gènes peuvent se réaliser à des fréquences beaucoup plus élevées que le sol nu. C'est par exemple le cas d'une plante en décomposition qui devient le siège d'une importante colonisation par les bactéries du sol qui trouvent alors des conditions physiologiques très favorables au transfert de gènes alors facilement détectable même quand les gènes sont transférés à partir d'une plante transgénique. Ces deux exemples tendent à rendre plus cohérents résultats *in silico* et expérimentaux sur l'importance évolutive et adaptative des THG.

L'autre série de questions a trait à la régulation du transfert de gènes que pourrait exercer la cellule bactérienne. Cette

problématique a été abordée à l'aide de la bactérie phytopathogène *R. solanacearum* dont le génome, totalement séquencé, révèle que plus de 13% des gènes ont été acquis de bactéries phylogénétiquement éloignées [halsde-00182457]. Cependant, des travaux expérimentaux sur ces génomes tendraient à montrer que l'acquisition de ces gènes est fortuite, sans possibilité de régulation par la cellule, leur fixation dans la population étant due à l'accroissement du potentiel adaptatif qu'ils confèrent à la bactérie. Ces études montrent aussi que cette bactérie est par contre capable de fortement réguler l'intégration dans son génome de régions d'ADN provenant de bactéries de la même espèce. Grâce à des séquences chi-like dont le rôle initial dans la réparation de l'ADN aurait été détourné, la bactérie régulerait son processus de THG de façon à maintenir l'intégrité de certains gènes tandis que d'autres régions du génome accumuleraient de la diversité génétique, cette combinaison devant être la plus favorable à l'accroissement de la valeur adaptative globale de la population.

#### IV. PERSPECTIVES

Un inventaire bactérien populationnel et fonctionnel quasi exhaustif d'un sol européen de référence est en cours de réalisation par séquençage complet de tout le métagénome extrait de ce sol (projets « Metasoil » (national, ANR GMGE) et « Terragenome », (international)). Intrinsèquement ces projets vont produire une mine d'informations sur le nombre réel d'espèces différentes présentes, leur répartition entre majoritaires et minoritaires en termes d'effectifs, la diversité des gènes fonctionnels, leur niveau de redondance parmi la communauté, l'importance des éléments génétiques mobiles. Ce sol et les données qui en seront tirées seront aussi le point de départ de projets visant à déterminer comment cette même communauté bactérienne réagit et s'adapte quand elle est soumise à des stress biotiques et abiotiques comme ceux présentés précédemment. Plus globalement ces projets fourniront la base de toute étude des mécanismes adaptatifs tant populationnels que cellulaires sur différents sites naturels ou anthropisés, comme ceux déjà étudiés au laboratoire que sont les sols naturels ou miniers de Nouvelle Calédonie ou des sites industriels européens contaminés par les composés chlorés. Ces mêmes approches métagénomiques seront aussi combinées aux approches expérimentales conventionnelles pour définir le rôle spécifique dévolu au THG dans l'adaptation des bactéries à ces conditions environnementales.

#### REFERENCES

- [1] Amann, et al., *Microbiol. Rev* **59**, 143-169 (1995)
- [2] Picard, et al., *Appl. Environ. Microbiol.* **58**, 2717-2722 (1992)
- [3] Bertrand, et al., *J. Microbiol. Methods.* **62**, 1-11 (2005)
- [4] Sanguin, H. et al., *Environ. Microbiol.* **8**, 289-307 (2006)
- [5] Lefevre, F. et al., *Res. Microbiol.* **159**, 153-161 (2008)
- [6] Boubakri, et al., *Gene.* **375**, 87-94 (2006)



## 5. Ingénierie écologique

R. Barthollet, F. Buret, S. Cecillon, L. Franqueville, N. Haddour, M. Lacroix, E. Navarro, P. Simonet, T.M. Vogel

**Abstract : Nous montrons en trois exemples comment la complémentarité de compétences autour des thématiques d' « ingénierie » et d' « écologie » permet d'aborder d'amont en aval, les problématiques environnementales qui ont justifié l'avènement de cette nouvelle science qu'est l'ingénierie écologique.**

### INTRODUCTION

L'ingénierie écologique est une science récente qui couvre des champs scientifiques et techniques très larges. Elle englobe les différents aspects fondamentaux et mécanistiques de la recherche en biologie dont les résultats pourront être mis en application en aval grâce à l'apport des sciences et techniques de l'ingénieur pour apporter des solutions à des problèmes environnementaux. Toute la gamme des problématiques liées à l'environnement et au développement durable relevant des différentes activités humaines, industrielles, agricoles, d'urbanisation rentre dans le champ d'application de l'ingénierie écologique. C'est avec l'objectif d'aborder le plus efficacement possible ces thématiques d'ingénierie écologique que s'est réalisée l'intégration du groupe de microbiologistes au sein d'Ampère, dont la vocation essentielle était et demeure tournée vers l'ingénierie. Les trois actions présentées dans cette notice montrent les différentes facettes du développement de l'ingénierie écologique dans l'équipe.

### DEVELOPPEMENT ET EXPLOITATION DES PILES A COMBUSTIBLES MICROBIENNES

Les piles à combustibles microbiennes, ou biopiles, sont des réacteurs permettant de produire de l'électricité à partir de composants n'ayant pas de valeur intrinsèque comme les déchets organiques contenus dans les effluents domestiques, industriels ou agricoles. De conception similaire aux piles à combustibles, ils génèrent de l'électricité à partir des réactions d'oxydo-réduction impliquées dans la dégradation de substrats organiques par les bactéries (Fig. 1).

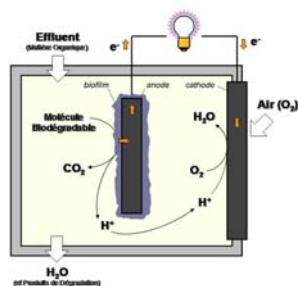


Fig. 1 : Principe de fonctionnement d'une biopile constituée d'une chambre unique contenant l'anode et la cathode à air avec une chambre alimentée avec des effluents.

Le développement de cette technologie est le fruit d'une approche pluridisciplinaire faisant appel à des compétences en écologie microbienne, génie électrique, électrochimie, biologie moléculaire et bio ingénierie, toutes présentes au sein du Laboratoire Ampère, avec comme finalités de i) sélectionner les bactéries électroactives les plus performantes dans les réacteur, ii) Modifier la chimie de surface des électrodes et l'architecture des réacteurs afin d'améliorer la cinétique du transfert électronique entre les bactéries et

l'électrode, iii) valider les performances optimisées des réacteurs en laboratoire, iv) Mettre en place des essais pilotes dans une station d'épuration.

Par exemple sur le plan microbiologique nous avons pu montrer que les espèces bactériennes qui se développent à la surface de l'anode sont différentes de celles des autres compartiments de la biopile (surfaces du réacteur, cathode, effluent) et qu'une sélection des bactéries responsables de la production d'électricité s'opère au cours du temps. Par ailleurs, l'application d'un potentiel aux bornes des électrodes permet d'enrichir les électrodes en bactéries électroactives, ce qui suggère que la sélection de certaines bactéries naturellement présentes dans les effluents pourraient permettre d'éviter l'utilisation de platine (verrou technologique). Nos objectifs sont maintenant de rechercher les conditions qui vont sélectionner les bactéries les plus performantes, d'isoler, identifier et étudier les propriétés de ces microorganismes avec les outils les plus novateurs y compris le séquençage complet de leur génome.

Les applications sont à plusieurs niveaux : les puissances électriques générées et le coût des réacteurs (contenant des métaux rares à la cathode) ne permettent certes pas encore de proposer une technologie applicable à très grande échelle. Mais les perspectives n'en sont pas moins séduisantes, ne serait-ce que par la production d'électricité qui permet de réduire les coûts de traitement des effluents. Une autre application concerne l'utilisation des biopiles comme bio-indicateurs de la qualité des effluents permettant de repérer quasi-instantanément l'entrée dans les bassins d'effluents nocifs entraînant un dysfonctionnement.

### REHABILITATION DES SOLS PERTURBES PAR LES ACTIVITES MINIERES.

L'utilisation des plantes pour la réhabilitation des sols pollués et plus spécifiquement la restauration des sites miniers qui s'est vraiment développée ces dix dernières années est une activité centrale de l'ingénierie écologique car elle peut constituer dans certains cas la seule solution de traitement des sols. Cependant, la mise en place de stratégies efficaces et véritablement respectueuses de l'environnement pour la restauration des terres dégradées par l'exploitation minière nécessite une connaissance approfondie du fonctionnement de ces écosystèmes. Le principal site pour nos travaux se situe en Nouvelle-Calédonie qui est considéré comme site modèle pour l'étude des écosystèmes terrestres se développant dans un contexte extrême de teneurs élevées mais naturelles en métaux. L'adaptation des plantes à ces milieux extrêmes et donc leur utilisation pour la réhabilitation des sites miniers est fortement dépendante de la communauté bactérienne du sol qui présente un très important potentiel adaptatif et dont la composition populationnelle et le potentiel fonctionnel sont également fortement conditionnés par les caractéristiques abiotiques de ces milieux.

Nos premières études ont été d'inventorier les populations bactériennes sur des sols plus ou moins affectés par l'activité minière par des approches métagénomiques avec amplification PCR séquençage du gène ribosomique 16S rDNA [1]. La diversité bactérienne a été estimée en termes de richesse en espèces bactériennes différentes y compris sous

son volet quantitatif mais aussi d'après leur diversité phylogénétique (figure 2).

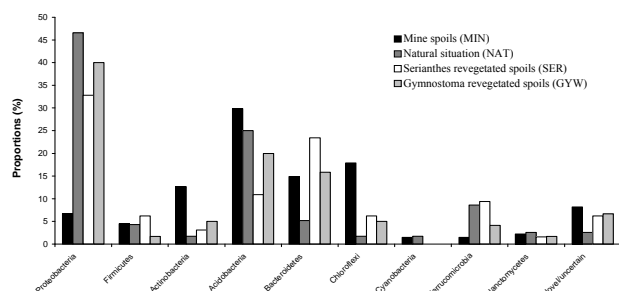


Fig. 2 Histogramme montrant la distribution des séquences (produit PCR du gène 16S rDNA) dans les différents phyla bactériens pour les situations sol naturel, déblais minier, déblais minier revégétalisé avec 2 plantes *Serianthes* sp. et *Gymnostoma* sp.

Dans un second temps, nos objectifs visent à étudier le plus exhaustivement possible grâce aux techniques métagénomiques le potentiel adaptatif des bactéries dans ces sols soumis à des stress par des métaux lourds. Toute une batterie de méthodes complémentaires est utilisée pour rechercher, séquencer et caractériser les différents gènes qui ont permis l'adaptation des bactéries de ces communautés à ces conditions de stress. L'intérêt de ces techniques est qu'elles permettent aussi de vérifier si la contamination métallique intervient dans la prolifération de la résistance aux antibiotiques des populations bactériennes, plusieurs travaux préliminaires semblant indiquer que ces deux types de déterminants génétiques pouvaient être associés. Enfin, cette étude est complétée par la recherche à proximité des gènes de résistance d'éléments génétiques mobiles susceptibles d'être impliqués dans la dissémination des déterminants de résistance entre bactéries de même génération. Pour ce qui est des métaux lourds la dissémination des gènes de résistance est certainement un élément clé de l'adaptation de la communauté bactérienne et en parfaite conformité avec les objectifs de l'ingénierie écologique si les plantes bio-accumulatrices bénéficient de cette adaptation. Par contre, elle serait totalement négative si les pollutions chimiques causées par l'homme contribuaient à décroître l'efficacité d'un nombre de plus en plus limité de molécules chimiques qui permettent de lutter contre les maladies infectieuses. Il faut enfin signaler que les résultats de ces travaux sont directement exploitables car ils fournissent des bio-indicateurs de l'état de contamination des sols que ce soient des populations bactériennes spécifiques ou un répertoire de gènes fonctionnels sont consultables grâce à deux types de puces à ADN, soit de type taxonomique (phylochip) soit de type fonctionnel comportant les signatures génétiques des gènes d'adaptation caractérisés.

#### EVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES PLANTES TRANSGENIQUES.

Les plantes transgéniques si décriées aujourd'hui pourraient cependant être des éléments clés de l'ingénierie écologique en réduisant le recours aux pesticides et aux intrants azotés, en permettant la réhabilitation et même la création de nouveaux écosystèmes durables grâce à des plantes rendues résistantes à la sécheresse, à la salinité, à des virus. L'évaluation de l'impact réel de ces organismes tant sur la santé que sur l'environnement est donc cruciale avec des conséquences économiques très importantes. Nos travaux ont

apporté un certain nombre de résultats concernant les possibilités de dissémination des transgènes aux bactéries du sol en montrant qu'il y a bien une spécificité OGM, l'origine procaryotique des gènes du transgène permettant le franchissement de la barrière génétique en particulier dans des « hot-spots » environnementaux que sont une plante infectée par un pathogène [2] et une plante en décomposition [3]. En plein champ nous n'avons pu mettre en évidence la preuve moléculaire d'un transfert génétique du gène marqueur de résistance à un antibiotique du fait de la présence naturelle de ces gènes dans les bactéries du sol [hal-00312917]. Ces conclusions ne s'appliquent cependant qu'à ce type de plantes et ne peuvent en aucun cas être généralisées à d'autres comme les OGM à vocation pharmaceutique dont les gènes du transgène codent la production de molécules bio-actives et pour lesquelles des expérimentations sont en cours.

L'ingénierie écologique pourrait cependant bénéficier de l'aptitude des transgènes des plantes OGM à être transférés aux bactéries du sol dans une application agronomique innovante qui consisterait à optimiser la dissémination d'un gène à partir de la plante en vue d'impliquer les bactéries du sol dans la réalisation de fonctions agronomiques ou environnementales spécifiques. Nous cherchons par exemple à déterminer si la microflore tellurique pourrait être mise à contribution pour dégrader un herbicide auxquelles les plantes auraient été rendues résistantes par transgénèse si les conditions de la dissémination du gène catabolique de l'herbicide, co-introduit dans la plante, pouvaient être optimisées.

#### V. PERSPECTIVES.

L'ingénierie écologique et notamment un de ses volets amont qui consiste à comprendre le fonctionnement des écosystèmes fortement anthropisés dans lesquels certaines populations bactériennes ont réussi à s'adapter vont bénéficier des nouvelles avancées de la métagénomique. Le séquençage complet du métagénome d'un sol de référence [hal-00391653] va révéler l'étendue des ressources génétiques que recèlent les bactéries du sol. Une des exploitations de ces travaux sera de transformer certaines de ces ressources génétiques en nouveaux outils au service de l'ingénierie écologique. La complémentarité des compétences en « écologie » et en « ingénierie » à Ampère est indéniablement un avantage pour optimiser l'application *in situ* de ces différents travaux.

#### REFERENCES

- [1] Herrera, A. et al.. Eur. J. Soil. Biol. 43, 130-139 (2007).
- [2] Kay, et al. Appl. Environ. Microbiol. 68, 3345-3351 (2002).
- [3] Rizzi, A. et al... Appl. Environ. Microbiol. 74, 1250-1254 (2008).

## 6. High Temperature Power Electronics

*B. Allard, D. Bergogne, P. Brosselard, C. Buttay, P. Bevilacqua, C. Joubert, M. Lazar, C. Martin, H. Morel, D. Planson, C. Raynaud, . Tournier A. Zaoui.*

**Abstract**—The availability of engineering samples of SiC-JFET has made high temperature power electronics possible, introducing new challenges. Ampere Lab. works on most of the requirements of the high temperature power electronics, i.e. - devices characterization and modelling, - SiC device design and fabrication, - drivers, - EMC filers, -Packaging among the most important issues.

### INTRODUCTION

Over recent years silicon carbide (SiC) power devices, such as Schottky diodes, have become commercially available. Power JFETs are supplied as engineering samples. With these two devices, it is possible to build most of the valuable power electronic converter architectures.

One main issue is to find the adequate applications where silicon carbide devices can advantageously replace classical silicon power semiconductor devices in spite of the higher cost of SiC components. The first class of applications for SiC power devices is systems where the use of silicon power devices is not possible due to the high ambient temperature. The second class of applications corresponds to systems where mass reduction is a big issue, e.g. for aeronautic systems: devices that can operate at a higher junction temperature require a much smaller cooling system.

However, most of the recent studies have shown that the use of SiC devices does not consist in a simple replacement of silicon devices by silicon carbide devices. Indeed a new design of the power electronic systems taking advantage of the properties of the new SiC power devices is required [hal-00400634].

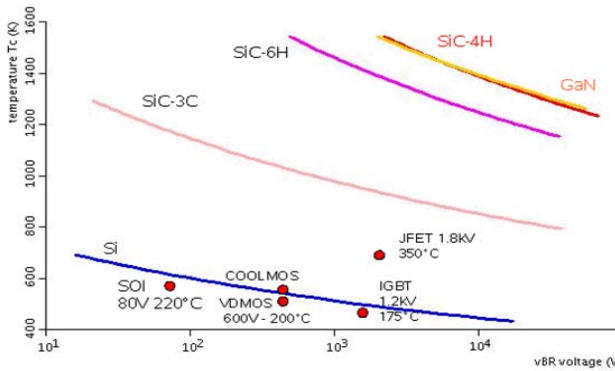


Fig. 1: Absolute Temperature limit versus voltage limit of semiconductor devices [1]

### HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS

Several recent studies address high temperature applications. For instance the More Electric Aircraft (MEA) requires high temperature power electronics for electrification of the actuators mounted on the aircraft engine. In such applications, the ambient temperature, i.e. the engine temperature, may reach 200°C. Due to self heating of the power semiconductor devices, the junction temperature may reach 250°C or even 300°C (573K). This temperature is above the silicon limit for a 1200V device (see Fig. 1), making SiC the only current solution for this environment. Several studies have indeed shown that a SiC-JFET-based inverter can operate properly in an ambient temperature of 300°C [hal-00369413].

### SCIENTIFIC CHALLENGES OF THE HIGH TEMPERATURE POWER ELECTRONICS

Fig. 2 shows a typical high temperature application, i.e. a smart-actuator including an EMC-filter, a capacitor, a JFET inverter (including 6 gate drivers), an inverter controller and the electromagnetic actuator itself (M). All of these elements must operate at high temperature.

That requires

- high temperature insulators and dielectric materials
- design and fabrication of high temperature power devices (lateral JFETs).
- characterisation of high temperature power devices (Bipolar & Schottky diodes, JFET, BJT ... )
- high temperature magnetic circuits
- design of high temperature gate driver circuits
- design of high temperature EMC
- high temperature reliability & packaging solutions.

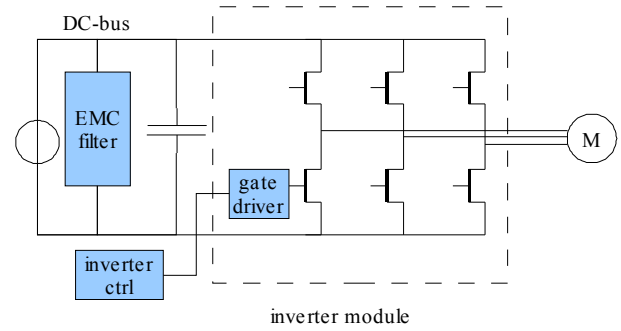


Fig. 2: Typical inverter linking a DC-bus to an actuator through an EMC filter and a capacitor filter

### AMPERE LAB. IMPLICATIONS IN HIGH TEMPERATURE POWER ELECTRONICS

#### A. High Temperature Equipments

Ampere Lab. has a strong history of devices characterization techniques, mainly based on electrical measurements. I-V and C-V for a wide range of voltage and current are available for bare dies and packages devices. The combination with heated chucks or a temperature conditioner enables high temperature measurement up to 300 °C. Moreover, a high temperature chamber is currently being installed, allowing electrical measurements, from non-encapsulated devices to whole power converters, at temperatures up to 600°C. This chamber was funded by 3 different projects, including CoTHT.

#### RELATED PROJECTS

The list of related projects is given in Table I. The SEFORA project is led by some aeronautic industries. It involves European Partners, among which SiCED/INFINEON, to manufacture devices. CoTHT is an academic project terminating at the beginning of 2009. It initiated new projects like COTECH, FEMINA and EPAHT.



Fig. 3: Picture of the high temperature chamber enabling high temperature electrical measurements (25 °C → 600 °C).

#### SIGNIFICANT RESULTS

In SEFORA, some high temperature inverter modules based on six dies (15 A, 1200 V, 300 mΩ) of SiC-JFETs from SiCED have been fabricated and successfully characterized at high temperature, i.e. cooled at 200°C.

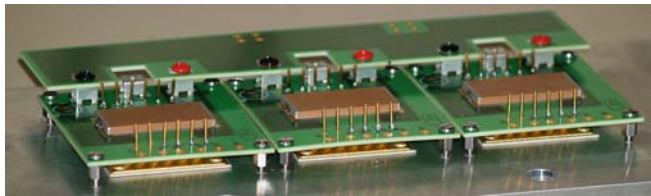


Fig. 4: Picture of 3 phase diode-less inverter based on SiCED SiC-JFETs.

Different versions of the inverter and gate drivers have been designed, manufactured and successfully characterized. They enabled to test and intensively characterize the inverter modules (Fig. 5).

During the course of CoTHT a high temperature metalization technology process has been developed and successfully characterized [hal-00391358].

this activity of Ampere Lab. is one of the strongest in the world, and can be compared with leading groups from US, Japan or the rest of Europe regarding High Temperature Power Electronics.

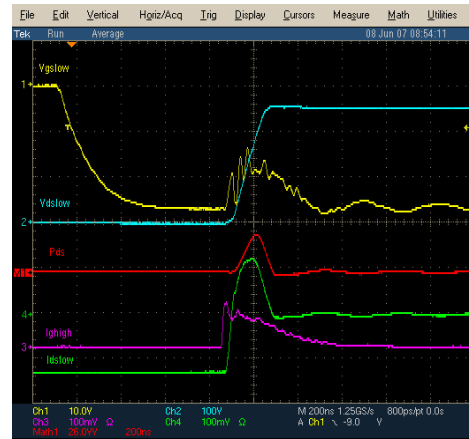


Fig. 5: High temperature characterisation of a SiC-JFET module (250V, 2,7A, 200°C)

Moreover, the high temperature activity started from SiC power semiconductor devices. For the years to come, if the activity on high-temperature power semiconductor devices continues, it will also encompass, accurate multi-physics modeling and characterization of power semiconductor devices, magnetic devices (inductors and transformer) and capacitors. In particular, there is a need of accuracy in a large temperature range, i.e. from -60° C

TABLE I – CURRENT RELATED PROJECTS

Acronym	title/subject (rôle of Ampere Lab.)	period	FINANCIAL SUPPORT
H2T-TECH	High Temperature & Voltage Technologies (SiC Power device characterization – Power converters).	oct. 2004 – oct. 2008	ANR/Predit
CoTHT	Very High Temperature ( $T_j > 300^\circ\text{C}$ ) Power Electronics (Lateral SiC-JFET for high temperature operation).	janvier 2006 - janvier 2009	ANR/blanc
SEFORA	Smart EMA For Operations in Rough Atmospheres (SiC-JFET characterization, SiC-JFET driver, High Temp. Capacitor Reliability Studies)	oct. 2007 – oct 2010	DGE – pôle Astech
SiC-HT <sup>2</sup>	High Temperature & Voltage SiC Power Devices (Design & Characterization of SiC devices)	sept. 2008 – sept. 2011	DGE – pôles aero.
FEMINA	EMC filter integration and high temperature EMC filter (high temperature material & devices characterization and modeling).	oct. 2008 - oct. 2011	FRAE
COTECH	High Temperature Integrated Circuit For Inverter and Gate Drivers in Silicon On Insulator, SOI, technology).	oct. 2008 - oct. 2011	FRAE
EPATH	High Temperature Packaging For Power Modules (High temperature reliability & die attaches).	oct. 2008 - oct. 2011	FRAE

#### CONCLUSION

With an history of more than 4 years in High Temperature Power Electronics resulting from almost 20 years in the field of SiC devices, more than 10 academic researchers (partially involved) and an average of 6 PhD students and 2 post-docs,



# 7. Electronique de puissance haute tension

A. Beroual, P. Brosselard, M. Lazar, H. Morel, D. Planson, C. Raynaud

**Abstract**—Le laboratoire Ampère travaille depuis le début des années 90 sur la réalisation de démonstrateur de composants de puissance haute tension en SiC. Le travail réalisé au cours de cette période repose sur l'ouverture vers de nouveaux matériaux semiconducteurs tels que le diamant, la réalisation de démonstrateurs 6.5 kV basée sur de nouvelles techniques (protection périphérique et passivation multiple) et le développement de la caractérisation des composants d'un point de vue électrique et physique (banc spécifique OBIC).

## INTRODUCTION

La limite en tension des composants industrialisés en Silicium est aux alentours de 6,5kV. La limite théorique étant de l'ordre de 10kV pour le Si, les semi-conducteurs grand gap sont nécessaires pour des applications plus haute tension. Au cours de la période 2007-2009, le laboratoire Ampère a réalisé la conception de diodes haute tension (8 et 40 kV) ainsi que des interrupteurs commandables (5 et 6.5 kV) de type thyristor en carbure de silicium, notamment. L'accent a été mis particulièrement sur la protection périphérique des composants et les problèmes liés à la passivation des composants.

Aujourd'hui, la forte demande industrielle correspond au domaine de la traction ferroviaire avec des besoins allant jusqu'à 50kV. A plus long terme, la distribution de l'électricité fera appel de façon banalisée à de l'électronique de puissance donc à des composants haute tension. Ce deuxième volet est un enjeu stratégique et de grande ampleur pour le monde (100 Milliards d'euros par an).

## CONCEPTION DE PROTECTIONS PERIPHERIQUES

Pour les composants de puissance, la protection contre le claquage prématuré en périphérie du composant est une étape primordiale. La montée en tension exige des protections avec une efficacité accrue, et un effort important a été mis sur la protection combinant plusieurs méthodes : Mesa+poche, triple poches implantées et gravées. Pour les dispositifs conçus, trois types de protection ont été retenus. Pour les diodes 5 kV, la solution envisagée est une protection par JTE (Junction Termination Extension). Cette technique repose sur la maîtrise de l'implantation ionique dans le SiC. Différents paramètres de la poche telles que la dose d'implantation et leur longueur conditionnent leur efficacité.

Une solution alternative à l'implantation est la gravure plasma, qui nécessite la maîtrise de la profondeur de gravure.

### A. Thyristor 5 kV

Lors des simulations, les solutions envisagées doivent absolument être compatibles avec la réalisation technologique. Ainsi les possibilités technologiques doivent être connues du concepteur qui doit se concerter avec les différents technologues partenaires (la société IBS ou la plate forme lyonnaise de l'INL). Après réalisation en collaboration avec l'ISL (Institut Saint-Louis), un exemple de résultat expérimental est illustré par la figure 1 où l'on peut voir que la tenue en tension du thyristor atteint une valeur de 4700 V.

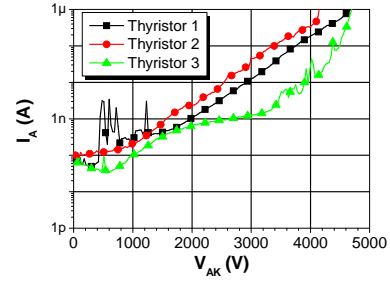


Fig 1 : Caractéristiques en mode direct-bloqué de thyristors planar protégés par mesa/JTE [hal-00410085]

### B. Diodes bipolaires 40 kV

Afin de répondre à un nouveau cahier des charges en terme de tenue en tension, un travail de simulation de diodes 40 kV a été initié. Le but de cette étude est de réaliser une diode en montrant l'intérêt d'utiliser une protection périphérique par multi-poches. Des simulations ont été réalisées avec 1, 2 et 3 poches.

La figure 2 illustre la structure simulée avec les paramètres à optimiser pour les trois poches.

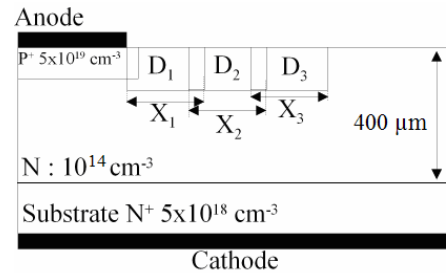


Fig 2. Vue en coupe de la diode avec la protection avec trois zones JTE ( $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$ ).

Un exemple de résultats est illustré par la figure 3. A travers ce graphe, nous remarquons qu'une terminaison multi-poche offre une marge d'erreur sur l'implantation plus importante qu'une protection mono-poche. Une efficacité de protection >92% est atteinte.

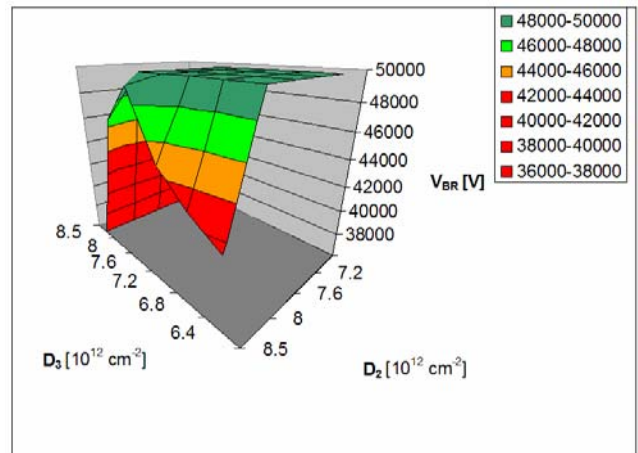


Fig 3 : Résultats de tenue en tension pour la protection trois poches JTE ( $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$ ) avec une dose  $D_1 = 8.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

Cette nouvelle technique de protection périphérique est très peu utilisée au niveau mondial et permet de répondre en partie au problème de la tenue en tension des composants haute tension (> 5 kV). Quelle que soit la protection

périphérique, il est indispensable également d'optimiser la passivation.

#### ETUDE PASSIVATION

La passivation est une étape technologique permettant de limiter l'arcage électrique des composants polarisés sous une tension élevée ( $> 1$  kV). Une des techniques employées est le dépôt de couche de diélectrique possédant un fort champ électrique de claquage en surface du semi-conducteur. Les matériaux usuellement utilisés sont le  $\text{SiO}_2$  et le  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Des simulations électriques sont réalisées afin de montrer l'influence de cette couche (unique ou multiple) sur la tenue en tension. La collaboration avec le laboratoire Laplace se poursuit sur la recherche de matériau pour la passivation avec la technologie SiC. Deux thèses ont été soutenues sur ce thème avec un matériau Polyimide sur des composants issus du laboratoire Ampère. Un résultat intéressant a été obtenu avec une tenue en tension de 7.3 kV [hal-00140104].

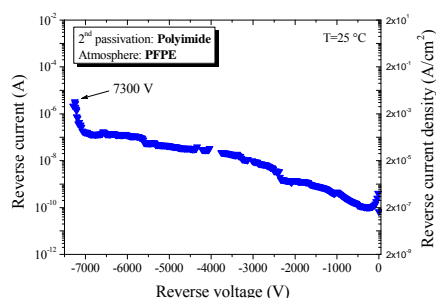


Fig. 4 : caractéristique électrique d'une diode bipolaire protégée par simple poche, mais passivée avec une couche épaisse de Polyimide dans du PFPE.

#### COMPOSANTS TRES HAUTE TENSION

Un projet ANR-Blanc a été accepté et débute en janvier 2009 pour la conception, la réalisation de diodes bipolaires SiC haute tension : 10 et 15 kV. Le laboratoire LMI est sollicité pour l'épitaxie en phase liquide (VLS) pour la réalisation de ces composants. De plus, nous souhaitons montrer la possibilité de réaliser des diodes bipolaires sur du matériau on-axis en partenariat avec l'université de Linköping.

Toujours avec l'objectif d'avoir des composants très haute tension, le laboratoire Ampère étend ses compétences vers d'autres matériaux grand gap, notamment le diamant. A ce titre, nous sommes impliqués dans un programme de recherche sur les composants en diamant (définition des paramètres de diodes Schottky et protection périphérique) en partenariat avec le LAAS.

Acronyme	Titre	Période	Support financier
H2T-Tech	Nouvelles TECHNOlogies de convertisseurs de puissance Haute Tension et Haute Température.	Oct. 2004 – Oct. 2008	Predit
SiC-HT2	Composants de puissance haute tension et haute température	Sept. 2008 – Aout 2011	DGE
VHVD	Very High Voltage SiC Devices	Janv. 2009 – Dec. 2011	ANR-Blanc
UFA-DFH	Programme de recherche franco-allemand	Sept. 2008 – Sept. 2011	
diamonix	Programme de recherche sur les composants diamant monocristallin	Nov. 2007 – oct. 2010	DGE

#### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Des résultats encourageants montrent une augmentation de l'efficacité de la protection périphérique en terme de montée

en tension et de rendement. Cette étude va continuer en utilisant des techniques de plus en plus complexes (combinaison des différentes protections) appliquées à tous les types de composants. L'objectif de tenue en tension passera progressivement à 10, puis 20 et enfin 30 kV. La technique d'OBIC est en cours d'amélioration avec un chuck chauffant permettant la validation de la conception et l'extraction des coefficients d'ionisation. À moyen terme, la maîtrise des modules haute tension, c'est à dire l'intégration hybride d'un convertisseur complet, sera un verrou technologique à résoudre.

#### REFERENCES

<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00380670/fr>  
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00391472/fr>

## 8. Intégration de puissance (conception, caractérisation, mise en oeuvre)

B. Allard, D. Bergogne, C. Buttay, M. Lazar, C. Martin, D. Planson, D. Tournier, C. Raynaud

**Abstract**—Le travail accompli au cours de cette période sur l'intégration de composants et fonctions spécifiques en SiC l'a été dans le cadre de plusieurs ANR, projets industriels et collaborations internationales. Des études de faisabilité validant l'intérêt du SiC et du SOI pour la réalisation de composants et systèmes intégrés de puissance ont conduit à la réalisation de nombreux démonstrateurs. Ainsi un convertisseur intégré monolithique en SiC a été fabriqué. Des composants spécifiques (limiteur de courant) ont été fabriqués. Des briques élémentaires pour l'intégration en SOI et SiC de circuits de commande de composants unipolaire et bipolaire ont été développées. Enfin une technologie originale d'interconnexion de puces et de fabrication d'inductances intégrées a été mise au point.

### INTRODUCTION

L'amélioration des performances (rendement, compacité, fiabilité, disponibilité, ...) en électronique de puissance passe par l'intégration, qui est aujourd'hui le moteur de la recherche industrielle et scientifique. En particulier, le carbure de silicium (SiC) offre d'excellentes perspectives en terme d'isolation électrique, de refroidissement, de température de fonctionnement et de capacité d'intégration hétérogène ou monolithique. Le SOI permet d'adresser à plus court terme les verrous technologiques (la technologie Bi-CMOS / SiC n'existant pas). L'objectif visé est la modélisation, la conception, la réalisation et la caractérisation de nouvelles fonctions, composants et convertisseurs intégrés, exploitant les possibilités offertes par le SOI et le carbure de silicium. Les applications visées vont de l'aérospatiale, le forage, l'aéronautique, le transport ferroviaire, les réseaux électriques de distribution jusqu'à l'automobile et la domotique.

L'intégration passe par le développement d'une technologie spécifique pour les composants passifs, les composants actifs et leurs interconnexion. Les résultats obtenus dans chacune de ces thématiques sont développés ci dessous.

### INTERCONNEXION ET COMPOSANTS PASSIFS

#### A. Interconnexion

Dans les modules de puissance actuels, les connexions électriques sont réalisées généralement par des fils de bonding. Dans certaines applications, nécessitant une densité de puissance élevée, la technologie wire bonding montre des limites électriques et thermiques. Elle est de surcroît incompatible avec les possibilités d'intégration 3D. Des technologies d'interconnexions 3D ont donc été développées pour répondre à ces exigences. Dans le cadre du projet ANR blanc 3DPHI, l'intégration tridimensionnelle d'un convertisseur est souhaitée. Pour réaliser celle-ci, une connectique sur des puces semi-conductrices sans brasure, basée sur des micro poteaux électro-déposés a été mise au

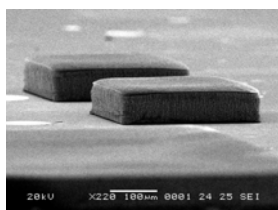


Fig.1. Images de  $\mu$ -poteaux réalisés par croissance électrolytique de Cu sur couche d'accroche Ti/Cu.

point. Une solution de reprise de contacts sans brasure sur les

micro poteaux a été testée sur des diodes et MOSFET en Silicium.

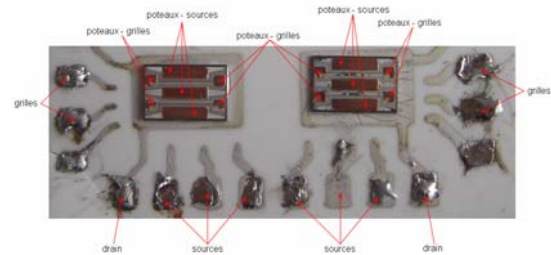


Fig.2. Contacts par micro-poteau réalisé sur des MOSFET-silicium

Les premiers résultats de caractérisation électrique sont relativement satisfaisants comme le montrent les mesures I(V) de diodes Si avant et après processus de reprise de contact.

#### B. Composants passifs : $\mu$ -inductance

L'éco-conception des SOC, dans la perspective de la gestion efficace de l'énergie, passe par l'amélioration des différentes briques des systèmes intégrés. L'équipe EPI du laboratoire Ampere s'est attachée à concevoir des convertisseurs monolithiques à 100MHz de fréquence de découpage. A ces fréquences de découpage, il devient raisonnable de s'intéresser à l'intégration monolithique des composants passifs (inductance) car leurs valeurs ne sont plus exorbitantes pour une technologie d'intégration. Les conception, fabrication et caractérisation des inductances ont été effectuées dans le cadre d'une collaboration avec les laboratoires DIOM de St Etienne et G2ELAB, co-financé par un projet SEEDS et un BQR-INSA.

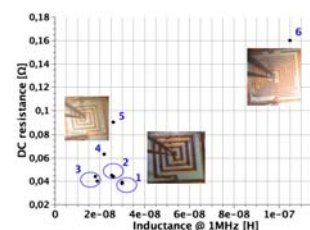


Fig.3. Inductance fabriquées sur un substrat YIG (matériau magnétique) (gauche), caractéristiques mesures (droite).

Les résultats obtenus permettent d'envisager la réalisation de  $\mu$ -convertisseur DC/DC intégrés sur une puce [hal-00391358].

### INTEGRATION MONOLITHIQUE

#### A. Intégration de Convertisseur : Anr jfet-sb et Anr cotht

Le but du projet développé dans le cadre de l'ANR JFET-SB est de réaliser une association d'interrupteurs en carbure de silicium (SiC) éléments de base de tout convertisseur d'électronique de puissance. L'objectif final est la réalisation d'un bras d'onduleur monolithique en SiC de calibre 600 V, 10 A. L'intégration monolithique permet de réduire de façon spectaculaire les éléments parasites dus au câblage. Le bras d'onduleur peut être aussi vu comme un hacheur de tension utilisable plus généralement pour les applications électriques connectées au secteur. Le premier lot de composants de l'onduleur monolithique en SiC a été fabriqué. Il comporte des JFET et des diodes bipolaires intégrées. Ce choix résulte principalement de la maturité technologique des composants SiC et de notre expérience acquise dans la réalisation de ces



composants. Les structures ont été optimisées par simulations éléments finis et les masques de fabrication ont été dessinés (Fig. 4, gauche). Les étapes technologiques nécessaires à la fabrication de JFET de type N et de type P ont été mises au point, avec un effort particulier porté à l'obtention de contacts ohmiques compatibles avec des applications haute-températures. Plusieurs échantillons fabriqués (Fig. 4, droite)) ont permis de valider l'aspect fonctionnel des composants.



Fig.4. Masque de fabrication (droite), échantillon fabriqué (gauche)

En effet, des contacts ohmiques ont été obtenus sur SiC de type P en utilisant des alliages Ti/Ni. Les valeurs de résistances spécifiques de contact ( $\rho_{\text{hoc}}=1\text{e-}4 \text{ Ohm.cm}^2$ ) sont l'ordre de grandeur de l'état de l'art mondial [hal-00391358]. Leurs caractéristiques ont été mesurées jusqu'à 650K et n'ont pas mis en évidence de changement notable. Les JFET fabriqués ont un comportement normalement bloqué à tension de commande nulle (Fig.5). Ils présentent une tenue en tension de 650V (Fig.6), ces résultats étant proches du cahier des charges initial.

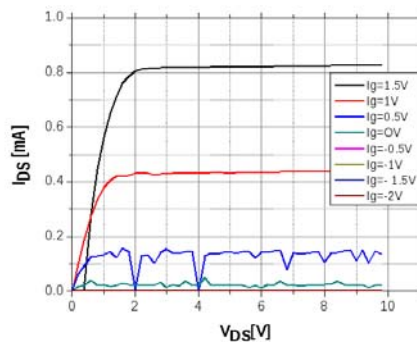


Fig.5. Réseau  $I_{DS}(V_{DS})$  versus  $V_{GS}$  d'un JFET de type P.

## B. INTEGRATION DE FONCTIONS :

L'objectif du travail de l'ANR COTHT est le développement d'un circuit intégré de commande rapprochée du driver, capable de fonctionner à haute température. Ce travail a permis l'évaluation d'une technique de fabrication de composants par re-épitaxie dans le cadre d'une collaboration avec une équipe suédoise (KTH). Des étapes de gravure profonde et de reprise de contact sur zones gravées ont été optimisées et validées par la mesure des caractéristiques de JFETs. Ces composants constitueront l'étage de commande rapprochée des convertisseurs de puissance. Plusieurs architectures de circuits de commande ont été simulées, afin de développer des circuits intégrés en SiC. Ces circuits permettent de disposer des fonctions élémentaires d'un étage de commande de composant de puissance (contrôle des temps morts), de mise en conduction et du blocage des composants.

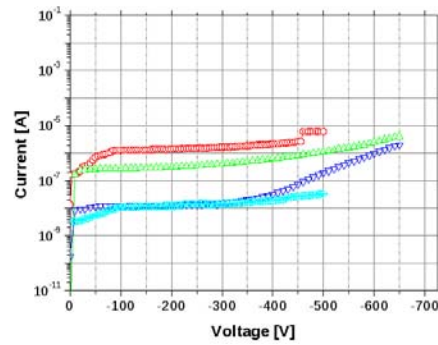


Fig.6. Caractéristique de tenue en tension d'un JFET de type P.

Ces travaux constituent une base pour le développement stratégique de CI « tout SiC » dans la perspective d'amélioration de la fiabilité des systèmes intégrés.

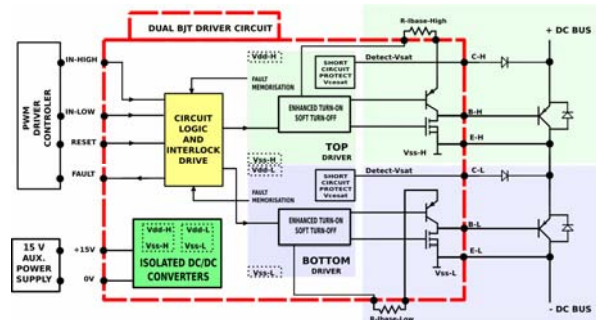


Fig. 7. Architecture de circuit de commande de transistors bipolaire.

Ces fonctions ont été validées dans le cadre d'un projet européen financé par ECPE (European Center for Power Electronic). Un démonstrateur de circuit de commande (Fig. 7) d'un transistor bipolaire (BJT) en SiC utilisant des composants discrets en silicium a été fabriqué. Les mesures illustrent l'impact négligeable de la température de fonctionnement sur les performances dynamiques (Fig. 8).

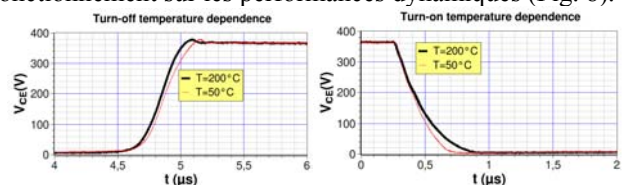


Fig.8 : Caractéristiques en commutation de BJT en SiC (turn-off gauche, turn-on droite), en fonction de la température de fonctionnement.

## INTEGRATION DE FONCTIONS SPECIQUES

L'expansion, des réseaux électriques a fortement contribué à l'augmentation des risques d'apparitions de défauts, tels qu'une surtension ou une surintensité. Ces développements ont favorisé l'émergence de dispositifs de protections séries. Des composants capables de limiter le courant à 450A pour de fortes valeurs de densité de puissance ont été fabriqués [hal-00391376] et caractérisés (Fig. 9) dans le cadre d'un contrat industriel. Cette réalisation ouvre la porte à de nouvelles applications de protections séries.

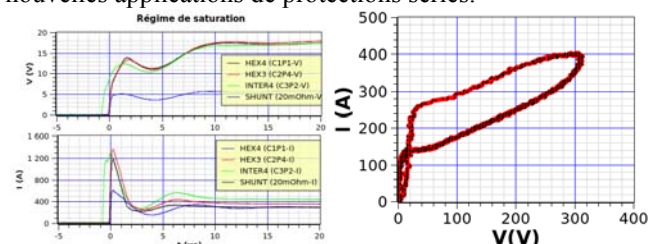


Fig. 9. Caractéristiques de composants limiteurs de courant (dynamique (gauche), statique (droite))

## 9. High Voltage and Dielectric Materials

T. Aka, A. Beroual

**Abstract** - This summary reports on our activities in high voltage and dielectric materials domain. We present here the main features related to the pre-breakdown and breakdown phenomena in the bulk of materials (liquid, long air gaps, gas and gaseous mixtures) and at solid/liquid and solid/gas (mixtures) interfaces as well as outdoor insulation.

### CREEPING DISCHARGES PROPAGATING OVER SOLID/LIQUID INTERFACES

#### A. Influence of voltage waveform, type of insulating materials and hydrostatic pressure

This work is aimed at the influence of the voltage waveform (lightning impulse, dc and ac), the kind of liquid and solid insulator and the hydrostatic pressure on the morphology and final length as well as the current and electrical charge of creeping discharges propagating over solid / liquid insulating surfaces in a point-plane electrode arrangement. We showed that the characteristics of creeping discharges depend on the voltage waveform and the properties of solid insulator. For a given solid sample, the final length  $L_f$  (i.e. the maximum extension) of discharges is higher with ac than with lightning impulse voltage and dc.  $L_f$  increases quasi-linearly with the voltage; and the thinner the solid sample and/or the higher its dielectric constant, the longer the discharges are, whatever the voltage waveforms. The threshold voltage required to initiate the creeping discharges are higher with dc than with ac and lightning impulse voltages. The current record in relative long time scale shows the occurrence of a secondary discharge of an opposite polarity to that of the applied voltage. This is likely due to the space charge accumulated at the solid insulating surface when the discharge propagates, resulting in a modification of the electric field. The electrical charge decreases when the thickness of insulator is increased and increases with the dielectric constant of insulator. This indicates the important role of capacitive effects in the development of creeping discharges.

On the other hand, the hydrostatic pressure acts on the creeping discharges by reducing the lengths of their branches and by increasing their initiation threshold voltage whatever the voltage waveform and polarity indicating the implication of gaseous mechanisms. This constitutes an original result which could be a useful tool for the dimensioning of solid / liquid insulating system in high voltage oil-filled apparatus.

#### B. Fractal analysis of creeping discharge patterns

By using the box counting method, we showed that the discharge patterns present a fractal dimension  $D$  which depend on the thickness of the solid samples ( $e$ ) and the type of insulator [hal-00141452].  $D$  decreases when  $e$  increases; it increases with the dielectric constant ( $\epsilon$ ) of insulator. This dependency of  $D$  on the solid insulators and their thickness reveals the existence of a relation between the fractal dimension and the physical parameters. The density of branches  $\rho(r)$  depends on  $e$  and  $\epsilon$ .

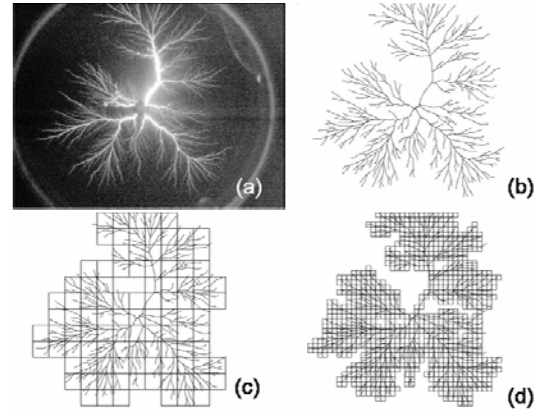


Fig. 1: Application of box counting method: (a) original image, (b) the extracted binary image, (c) and (d) the binary image covered by squares of side  $l = 40$  pixels and  $l = 10$  pixels respectively.

### INVESTIGATIONS ON MINERAL AND ESTER OILS FOR POWER TRANSFORMERS

#### A. Pre-breakdown and breakdown phenomena

Experimental investigations have been achieved on mineral oils, synthetic esters and natural esters (vegetable oils) issued from different origins. Different characteristics such as the dielectric strength, ageing stability, gassing tendency and heat transfer efficiency are analyzed. It is shown that before ageing, natural and synthetic esters present a breakdown voltage (BDV) close to that of mineral oil while after ageing, natural esters generally keep a good BDV and are even sometimes better than mineral oils. Natural esters appear to be gas absorbing oils whereas synthetic ester is gas evolving. Natural esters have inherently low oxidation stability that can be improved by adding anti-oxidant additives and thus compete with non inhibited mineral oils. Their heat transfer seems to be less efficient than mineral oils even if some ester oils can have a viscosity closer to that of mineral oil. The study of the initiation and propagation of streamers in numerous synthetic and natural esters is iprogress.

#### B. Static Electrification phenomena

The static electrification phenomenon has been studied versus the temperature and the properties of solid/liquid interface. The investigations are achieved on a test cell with a rotating metallic disk coated on both sides with thin layers issued from different kinds of materials (polytetrafluoroethylene (Teflon), aluminium and silicon). We showed that the static electrification current is influenced by the type of oil/solid interface, the rotating velocity, temperature and ageing. The temperature acts as an ageing factor. This current generally increases with the rotating velocity, temperature and ageing. For a disk coated with pure aluminium, all measured currents are negative with fresh oil and positive with aged oil. For a disk coated with silicon or Teflon, changes of the currents polarity have been observed. On the other hand, the electrodes coating with thin layers of Teflon enables to improve the ac dielectric strength.

## CREEPING DISCHARGES PROPAGATING OVER SOLID/GAS AND SOLID/GASEOUS MIXTURES INTERFACES

This research deals with the experimental characterization of discharges propagating over solid insulators immersed in a gas or a gaseous mixture, under lightning impulse voltages (1,2/50  $\mu$ s), using a point-plane electrode arrangement. The morphology of discharges and their final lengths are analyzed versus the amplitude and polarity of the voltage, the kind and pressure of the gas (or mixture). Different kinds of gases ( $N_2$ ,  $SF_6$ ,  $CO_2$ ) and mixtures ( $SF_6-N_2$  and  $SF_6-CO_2$ ) are considered. It's shown that the shape of discharges and their final lengths  $L_f$  depend significantly on the solid insulator and the type of gas [hal-00410081]. For given solid and gas,  $L_f$  increases quasi-linearly with the voltage and decreases when the gas pressure increases. The discharges don't always present a radial structure as reported in literature. For given voltage and pressure,  $L_f$  is higher when the point electrode is positive than when it's negative while the initiation voltage of discharges is higher with a negative point than with a positive one indicating thus that the penalising polarity is the positive one.  $L_f$  is shorter in  $SF_6$  than in  $CO_2$  or  $N_2$ . The increase of  $SF_6$  content in  $SF_6-CO_2$  mixture leads to a significant decrease of  $L_f$ . On the other hand,  $L_f$  is very influenced by the thickness of insulator. It decreases when the thickness of insulator is increased. For an insulator of PTFE-B,  $L_f$  is shorter and his flashover voltage higher than that for glass and PTFE-A.

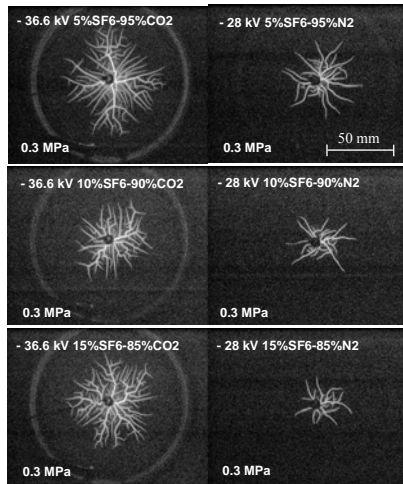


Fig. 2: Influence of concentration of  $SF_6$  in  $SF_6-CO_2$  and  $SF_6-N_2$  mixtures on creeping discharges propagating over glass at a gas pressure of 0.3 MPa.

## MODELING OF THE NEGATIVE DISCHARGE IN LONG AIR GAPS AND NEGATIVE LIGHTNING

A self consistent model enabling to describe the whole negative discharge sequence, initiated in long air gaps under impulse voltage waves has been established [hal-00312914]. It takes into account the different phases of the propagation such as the initiation of the first corona, the pilot leader, the electrode and space leaders, and their junction. It uses a  $LCR$  equivalent electrical network the parameters of which vary with the time according to the discharge characteristics and geometry ( $L$ ,  $C$  and  $R$  being respectively the inductance, the capacitance and the resistance). The salient feature of the model is that it takes into account the geometry of the gap while including the step-like propagation of the discharge. It has successfully against laboratory discharge conditions even if some improvements are necessary. It provides the spatial

and temporal evolution of the different characteristics of the discharge such as its trajectory, the current waveform and the corresponding electrical charge, the energy and power injected into the electrode gap, the potential gradient in the leader channel, the voltage at the tip of the discharge, the temporal evolution of the channel thermal radius, and the instantaneous propagation velocity. The validity of the model was verified by comparing the computed results with the experimental results of previous researchers and good correlation has been shown.

The elaborated model has been successfully extended the negative lightning discharge and to simulate the electromagnetic fields it radiates. The obtained results are found to be in a good agreement with trends of those recorded during natural lightning. This model also constitutes a useful tool for the predetermination of the lightning protection parameters such as the impact striking point as well as the striking distance of lightning.

## DYNAMIC MODEL OF DISCHARGES PROPAGATING ON DISCONTINUOUSLY POLLUTED SURFACES

Our activities in outdoor insulation area are mainly focused on the elaboration of predictive dynamic models enabling to determine the characteristics of discharge propagating over continuously or discontinuously polluted insulators submitted to different voltage waveforms [hal-00314174]. This model uses an equivalent electric network and takes into account the instantaneous changes of the discharge parameters. It provides the temporal evolution of the different parameters of the discharge (up to flashover) versus the characteristics of the insulator (geometry, distribution and conductivity of contamination deposits).

Some experimental characterization and modeling of discharges propagating over non-uniformly polluted circular insulator models have been also achieved. This concerns more especially the influence of the width and the conductivity of contamination bands on the discharge patterns and the associated currents. It's shown that the characteristics of creeping discharges depend on the voltage and the length, width, thickness and conductivity of each band of the insulator surface. Depending of the conductivity of polluted bands, the discharge channels can be continuous or not. For pollution bands of high conductivity, the discharges consist of discontinuous straight lines centered at the point electrode; the discontinuities appear at the polluted bands. The final length and the number of branches are more important with a positive point than with a negative one.



# 10. Matériaux magnétiques

R. Goyet, L. Krähenbühl, C. Martin, L. Morel, M.A. Raulet, F. Sixdenier

**Résumé** —. L'activité matériaux magnétiques s'intéresse aux méthodes de caractérisations globales et locales des propriétés des matériaux magnétiques. En particulier, la modification des propriétés magnétiques vis à vis du comportement fréquentiel, temporel ainsi qu'en température est étudiée. Toutes ces modifications de propriétés sont modélisées de manière à pouvoir implanter ces modèles dans des logiciels de simulation ou de conception.

## INTRODUCTION

Le comportement des matériaux dans les matériels et systèmes électriques est à la base de leurs performances. Nous avons pour objectif la connaissance expérimentale et la modélisation théorique des matériaux magnétiques, actuels ou en cours de développement, en vue de leur mise en œuvre dans les matériels et systèmes du génie électrique, dans des conditions optimisées et compatibles avec l'environnement. Les compétences nécessaires pour réaliser ces objectifs sont :

- la caractérisation des matériaux magnétiques en global et local,
- la modélisation des propriétés des matériaux,
- le calcul des pertes et la prédiction des formes d'ondes des courants, tensions dans des systèmes complexes,
- le calcul de champ électromagnétique en 2D et 3D.

Nous allons décliner ces activités en trois groupes :

**Caractérisation de matériaux magnétiques, Modélisation et optimisation, Conception et dimensionnement d'actionneurs et capteurs innovants.**

## II. CARACTERISATION DE MATERIAUX MAGNETIQUES

### A. Caractérisation magnétique locale in situ

Des premiers résultats en utilisant la technique des « pointes » [1] pour la mesure de l'induction  $\mathbf{B}$  et une « H coil » pour la mesure de l'excitation  $\mathbf{H}$  ont été réalisés. Ce type de capteur permet de relever localement le cycle d'hystérésis d'un matériau. Ceci permet ainsi de revenir aux pertes magnétiques locales dans une géométrie complexe et ainsi d'en obtenir une cartographie (voir Figure 1). Pour corréler ces résultats, nous pouvons utiliser une caméra infra-rouge en relevant l'évolution de la température dans un système soumis à un champ magnétique.

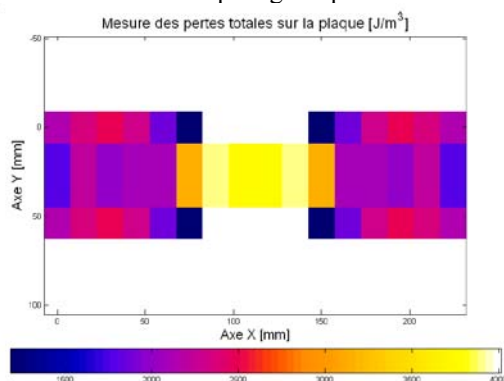


Fig. 1 : Cartographie de pertes sur une tôle découpée

### B. Banc de caractérisation haute température

Afin d'étudier le comportement des matériaux magnétiques en fonction de la température, un banc de caractérisation à haute température est en train d'être développé. Un four à haute température (800°C) à atmosphère contrôlée est déjà en place.



Fig. 2 : Four Haute température

### C. Base de données de matériaux (Magathèque)

Pour pérenniser les données des divers matériaux testés au laboratoire, une base de données a été créée. Celle-ci permet de stocker des mesures, ainsi que diverses données concernant le matériau et les paramètres des modèles. Cette base de données est un outil de partage des connaissances, du même type que la plateforme de partages de modèles développée dans le projet DIMOCODE dans lequel nous sommes impliqués puisqu'elle est accessible par le web [2] (connexion par login et mot de passe). Le logiciel Reluctool (développé par Cedrat) aura un lien étroit avec cette base de données car ce logiciel utilisera une partie des modèles de comportement des matériaux développés au laboratoire.

## III. MODELISATION ET OPTIMISATION

### A. Modélisation du comportement temporel

Deux modèles de comportement dynamique de matériau (et de circuit) élaborés par le laboratoire (Dynamic & Static Feedback et Diffusion & Wall Motion models) permettent une représentation complète des phénomènes dynamiques développés dans le matériau (ou le circuit). Ces modèles intègrent des lois statiques réalistes de matériaux. A cet effet, des modèles d'hystérésis statiques ont été spécialement élaborés (modèle de la dérivée et réseaux de neurones). L'intégration des modèles dynamiques de matériaux dans des modélisations de dispositifs électromagnétiques par calcul de champ 2D ou par réseaux de réductances est en cours d'élaboration et permet de représenter des régimes transitoires de circuits [hal-00312899], [hal-00312919], [hal-00398667], [hal-00359372].

### B. Détermination de paramètres magnétiques en utilisant les algorithmes d'optimisations

L'identification de paramètres associés aux modèles développés ou à d'autres modèles empruntés est faite grâce à des méthodes d'optimisation : algorithme génétique, simplexe ou essaim particulaires. La méthode PSO (essaim particulaires) a été spécifiquement implémentée pour l'identification des paramètres associés au modèle

d'hystérésis statique de Jiles Atherton [hal-00287808]. Ces travaux d'optimisation constituent un outil précieux permettant de compléter la base de données citée

### C. Modélisation de propriétés couplées

Grace aux méthodes d'optimisation, nous avons pu réutiliser les modèles existants pour identifier des paramètres pour différentes températures. Ceci a permis de dégager des "tendances" de comportement pour chaque paramètre en fonction de la température très rapidement. Deux types d'applications sont visés ici. Les applications pour l'électronique de puissance d'une part (filtre CEM) et les applications de types actionneurs (pour l'avionique par exemple).

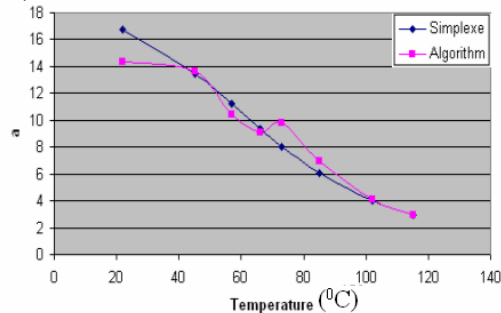


Fig. 3 : Évolution du paramètre "a" du modèle de Jiles Atherton identifié suivant deux méthodes d'optimisation en fonction de la température

## IV. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'ACTIONNEURS ET CAPTEURS INNOVANTS

### A. Logiciel « Reluctool »

En collaboration avec le G2ELAB, nous développons un logiciel de conception et de dimensionnement pour des systèmes du génie électrique basé sur les réseaux de réductances. A l'intérieur de ces réductances, des modèles de propriétés dynamiques de matériaux seront implantés de manière à prendre en compte leur effet sur les régimes transitoires ainsi que sur les pertes [3].

### B. Actionneurs fortes dynamiques

Un démonstrateur de type actionneur vibreur à forte dynamique a été développé avec des matériaux "innovants" (Soft Magnetic Composite) pour montrer la faisabilité et les conséquences sur la conception en utilisant de tels matériaux.

### C. Actionneurs et capteurs haute sensibilité

Deux types de systèmes industriels ont nécessité l'ensemble des compétences citées plus haut. L'un concerne un système de déclenchement pour disjoncteur différentiel, l'autre un capteur de courant à technologie effet Hall à boucle fermée. Dans les deux cas, les propriétés dynamiques du matériau jouent un rôle crucial dans la réalisation de la fonction désirée du système. Les approches développées ont permis de répondre avec succès aux problématiques rencontrées dans le milieu industriel pour la modélisation et l'aide à la conception de tels systèmes [hal-00258255], [hal-00369257], [hal-00369259] et [hal-00368725].

### D. Capteur magnétique 3D

Un capteur de champs magnétiques 3D a été conçu en collaboration avec la société Arcelor. Les intérêts principaux sont la précision sur l'orthogonalité des axes et son faible coût. Ce capteur a fait l'objet d'un dépôt de brevet n°1000025428 (février 2008)

## V. PROJETS ET CONTRATS

### A. Projets et brevets

TABLE I  
LISTE DES PROJETS

Réf.	Acronyme	Titre	FINANCEUR
[Proj-1]	DIMOCODE	Diffusion Internet de Modèles pour la Conception Optimale des Dispositifs Energétiques	Programme interdisciplinaire Energie CNRS
[Proj-2]	FEMINA	Filtrage Electromagnétique et Matériaux pour l'INtégration en Aéronautique	FRAE
[Proj-3]	Filtre CEM-	Conception et Réalisation de filtre CEM haute température	DGA
[Proj-4]	Climanthrope	Etude de l'effet de site dans les milieux naturels	ANR
[Proj-5]	Magathèque	Banque de données de matériaux	ANVAR
[Proj-6]	INDIGO	Conception et réalisation de micro inductance haute fréquence	SEEDS + Fonds propres
[Brev-1]		Capteur 3D	Région

TABLE II  
LISTE DES CONTRATS

Réf.	Acronyme	Titre	FINANCEUR
[Cont-1]	TYA	Nouvelle gamme de capteurs de courant « TYA »	ABB
[Cont-2]	PlastoMoteur	Etude faisabilité d'un stator formé de particules magnétiques thermo injectées	Erce Plasturgie

## REFERENCES

- [1] F. Fiorillo, Characterization and Measurement of Magnetic Materials, Academic Press (January 5, 2005)
- [2] <http://ampere.univ-lyon1.fr/materiauxdb/1.2/>
- [3] A Benchmark of Discontinuous Electromechanical System and Solving by a Mixed Adaptive Time Step Numerical Method, P. Do Thai, L. Gerbaud, F. Wurtz, V. Leconte, E. Morin CEFC 2008.

# 11. Composants passifs et systèmes de stockage

## Modélisation, caractérisation, commande, fiabilité, vieillissement et diagnostic

G. Clerc, M. Di Loreto, C. Joubert, C. Martin, G. Rojat, P. Venet

**Abstract** - L'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances des composants passifs, des systèmes de stockage d'énergie et l'optimisation de leur intégration dans les équipements et les systèmes embarqués compte tenu des contraintes particulières (hautes températures, cyclage de puissance, etc.) qu'ils subissent. La modélisation, la caractérisation et l'amélioration de la sûreté de fonctionnement de ces dispositifs ainsi que la commande des équipements les intégrant sont étudiées.

### INTRODUCTION

Compte tenu de leur capacité à stocker de l'énergie, les condensateurs et les inductances sont des composants passifs indispensables dans les circuits d'électronique de puissance. Les condensateurs à films polypropylène métallisés et électrolytiques sont très utilisés car ils associent, un faible coût, une propriété d'auto-cicatrisation pour les uns et une forte capacité pour les autres. Leur principal défaut est lié à leur sûreté de fonctionnement : les condensateurs électrolytiques ont un taux de défaillance élevé et ceux à films polypropylène métallisés présentent des risques d'inflammation en cas de défaut. L'amélioration de leur sûreté de fonctionnement est donc primordiale.

Aujourd'hui, le stockage de l'énergie électrique constitue un axe de recherche majeur, notamment dans les applications de la traction électrique. Ainsi les supercondensateurs ou les batteries constituent les composants idéaux des systèmes nécessitant de stocker et de restituer de l'énergie respectivement sur des courtes ou longues durées. Comme tous les générateurs électrochimiques, ces composants présentent une période d'usure préjudiciable pour leur durée de vie. De plus la majorité de ces composants comporte un électrolyte pouvant être considéré comme dangereux. L'étude de leur sûreté de fonctionnement est donc, là aussi, fondamentale.

Pour tous ces composants, l'amélioration de leur performance, de leur fiabilité et la pratique de la maintenance prédictive est donc fondamentale pour le bon fonctionnement et la disponibilité des systèmes dans lesquels ils sont employés. Cette amélioration nécessite la connaissance du comportement des composants en fonction des contraintes qu'ils subissent. Cette dernière est obtenue grâce à différentes méthodes de caractérisation permettant l'obtention de modèles comportementaux.

### CARACTERISATION ET MODELISATION

#### A. Condensateurs à films polypropylène métallisés

Un simple circuit RLC série ne suffit pas toujours pour représenter finement le comportement des condensateurs. Pour les condensateurs à films polypropylène métallisés, des modèles analytiques de répartition du champ magnétique (symétriques et asymétriques) et des courants au sein des condensateurs à films métallisés ont été établis [hal-00372975]. Ceux-ci prennent en compte les courants induits dans les armatures des condensateurs (cf. figure 1) et donnent

une image fidèle de l'impédance et des pertes dans les condensateurs.

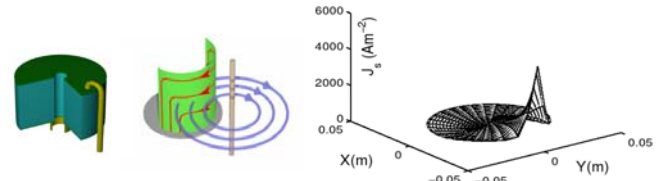


Fig.1. Modélisation des courants induits dans les armatures des condensateurs

#### B. Condensateurs électrolytiques à l'aluminium

Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont très sensibles aux variations de températures à cause des changements de propriétés de l'électrolyte. Pour les températures négatives, les modèles électriques classiques ne sont pas satisfaisants. Des modèles possibles, représentant correctement le fonctionnement aux températures positives et négatives, ont donc été développés [hal-00140546].

#### C. Supercondensateurs

Deux méthodes sont utilisées pour caractériser complètement les supercondensateurs : la caractérisation fréquentielle et celle temporelle [hal-00411480].

En considérant, en première approximation, que les électrodes poreuses des supercondensateurs peuvent être considérées comme constituées de plusieurs pores cylindriques identiques en parallèle, le fonctionnement fréquentiel du composant peut être représenté par le schéma équivalent intitulé « modèle à simple pore » [1]. Le phénomène de redistribution des charges entre les pores de tailles différentes est donc négligé ce qui impacte directement la tension. Suite aux travaux de recherche effectués en collaboration avec l'INRETS, un modèle multi-pores a été élaboré. Celui-ci considère donc que le charbon actif est constitué d'un certain nombre de classes de pores de tailles différentes (cf. fig. 2).

Néanmoins, ce modèle identifié grâce à une caractérisation fréquentielle, comme ceux de type circuit de la littérature tirés d'une caractérisation temporelle [2], ne prennent pas en compte les mécanismes d'autodécharge. Or celle-ci permet de connaître la durée de disponibilité de l'énergie stockée et doit donc être considérée. C'est une caractérisation temporelle qui peut la mettre en évidence. Nous avons proposés à travers deux nouveaux modèles de remédier à ce problème [hal-00179467, hal-00368848].

Enfin, comme le modèle sur la figure 2 est imprécis au-delà de la fréquence de résonance (de l'ordre d'une dizaine de Hz), nous avons proposé des améliorations de ce modèle [hal-00373140].

#### D. Batteries d'accumulateurs

Comme pour les supercondensateurs, le modèle de la figure 2 a donné aussi entière satisfaction pour un supercondensateur hybride lithium ion [hal-00373149].

Des modèles électriques de batteries de type plomb étanche ou lithium ion sont élaborés pour nous permettre, via une connaissance de leur état de fonctionnement, d'améliorer leur

cycle de charge décharge ou d'élaborer des systèmes de maintenance prédictive.

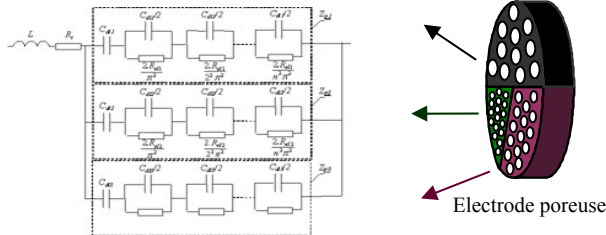


Fig.2. Modèle multi-pores des supercondensateurs

#### AMELIORATION DES PERFORMANCES ET DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT DES COMPOSANTS

Suivant les composants, plusieurs approches sont considérées pour améliorer leurs performances.

##### A. Condensateurs à films polypropylène métallisés

Les modélisations fines effectuées sur les condensateurs à films polypropylène métallisés (cf. § II-A) permettent d'analyser le comportement de composants de différentes géométries ou possédant différentes connectiques. Ainsi, il est démontré par exemple qu'un condensateur long présente une inductance équivalente série (ESL) plus grande qu'un composant plat qui a lui-même une ESL plus grande qu'un composant de structure annulaire [hal-00372975].

Une connaissance précise de l'impédance des condensateurs nous a permis d'étudier la faisabilité d'un quadripôle passif de type filtre intégrant condensateur et inductance [hal-00329845].

Enfin, l'utilisation de condensateurs dans des environnements sévères (condensateurs films et céramique à 200°C) de type avionique est étudiée. Différents tests de vieillissement accéléré sont élaborés et corrélés aux mécanismes de défaillances associés.

##### B. Condensateurs électrolytiques à l'aluminium

Le vieillissement des condensateurs à électrolyte liquide par évaporation de l'électrolyte est inéluctable. Nous avons développé plusieurs modèles en fonction du temps de vieillissement et de la température [hal-00140547].

Moyennant quelques lignes de codes supplémentaires, ceux-ci ont été intégrés dans un module de traitement numérique (DSP) habituellement utilisé pour commander une Alimentations Sans Interruption [hal-00369248, hal-00369572]. Une maintenance prédictive du convertisseur à moindre coût est alors réalisée.

##### C. Supercondensateurs

Au cours d'une collaboration avec le laboratoire SET de Belfort, nous avons effectué des vieillissements accélérés de supercondensateurs pour déterminer les coefficients de la loi d'Arrhenius reliant la température au temps d'utilisation des composants [hal-00372969].

Actuellement, dans le cadre des travaux de recherche intitulés « Etude de l'intégration et de la sûreté de fonctionnement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation des auxiliaires d'un bus », nous étudions la durée de vie du système de stockage. Nous faisons subir à un grand nombre de composants (environ 200) des essais de vieillissement accéléré, ce qui, nous permettra d'avancer dans la détermination de modèles complets de vieillissement. Par ailleurs, nous étudions l'élaboration d'une stratégie de commande par mode glissant

du hacheur associé à 120 supercondensateurs. Cette commande permet de réguler la valeur instantanée des signaux de sortie du hacheur, ce qui entraîne une meilleure gestion des modes transitoires.

La tension maximale d'utilisation d'un supercondensateur à électrolyte organique est limitée autour de 3 V. Dans la plupart des applications, plusieurs supercondensateurs doivent donc être placés en série pour obtenir un système de stockage utilisable. Pour différentes raisons chaque composant peut avoir des caractéristiques intrinsèques différentes. Ces dispersions peuvent entraîner des surtensions aux bornes de certains supercondensateurs lorsqu'ils sont placés en série, phénomène qui peut engendrer une diminution de la durée de vie. Pour cette raison, des circuits d'équilibrage sont utilisés. L'optimisation de différents systèmes d'équilibrage est étudiée en termes de performance et de fiabilité [hal-00411482].

#### PERSPECTIVES

Certains travaux présentés dans ce document pour les condensateurs et les supercondensateurs ne demandent plus qu'à être extrapolés aux accumulateurs électriques. Les supercondensateurs sont souvent associés aux batteries, car ils permettent de les assister lors des appels de puissance, ce qui a pour effet d'allonger la durée de vie des batteries qui subissent moins d'à coups de puissance. Une approche globale associant supercondensateurs, batteries, convertisseurs les pilotant doit donc être considérée.

Optimiser la charge des systèmes de stockage au regard des pertes occasionnées et de leur fiabilité constitue un objectif de recherche à examiner. La recherche de l'optimum de charge doit être corrélée avec l'étude des meilleures stratégies de commande des convertisseurs et d'équilibrage des différents éléments associés en série.

D'autres formes d'optimisation des composants passifs sont en cours : d'une part la recherche des matériaux, notamment magnétiques, les plus à-même d'être intégrés dans des filtres haute température (collaboration avec l'équipe « matériaux ») ; d'autre part l'amélioration du placement des composants passifs dans les filtres CEM afin d'augmenter l'atténuation des perturbations conduites. Ce dernier axe de recherche est mené en relation avec l'équipe « modélisation » (projet O2M/MCEM), et peut aussi aboutir à des avancées dans les domaines des convertisseurs intégrés (projet ISP3D).

Ces orientations futures de nos recherches sont dans la continuité des travaux déjà menés. Comme elles sont pluridisciplinaires (GE, électronique de puissance, physico-chimie, automatique), elles ne pourront être menées à bien qu'avec des collaborations universitaires et industrielles.

#### REFERENCES

- [1] S. Buller, E. Karden, D. Kok, R.W. De Donker, « Modeling the dynamic behaviour of supercapacitors using impedance spectroscopy », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, n° 06, Nov/Dec 2002.
- [2] Zubieta, R. Bonert, « Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, n° 1, Jan/Feb 2000.



## 12. Commande et gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée

B. Allard, X.F. Lin-Shi, J.M. Rétif

**Abstract**— Développement de solutions intégrées de conversion d'énergie, et élaboration et mise en œuvre d'algorithmes de commande plus efficaces des systèmes de conversion de puissance. Objectifs double : répondre à des verrous industriels au niveau matériel des organes de gestion de l'énergie et au niveau conceptuel de la commande en tenant compte de contraintes technologiques.

### INTRODUCTION

En associant les compétences dans les domaines de l'Automatique et de l'électronique de puissance intégrée, cette activité de recherche s'intéresse à la gestion d'énergie au sein de systèmes à forte intégration, ainsi que leurs commandes locale et globale<sup>4</sup>. Les travaux concernent les convertisseurs de puissance en général, mais les convertisseurs à tension de service faible, tels les systèmes nomades, introduisent des défis plus importants. Ces dispositifs visent une très forte densité d'intégration et des performances très exigeantes en fonctionnalité, rendement, bande passante, stabilité, robustesse, surface... L'utilisation des SMPS (*Switched-Mode Power Supply*), sous forme monolithique, est la solution la plus appropriée pour la conversion d'énergie au sein de ces systèmes.

L'augmentation du niveau d'intégration de ces convertisseurs s'accompagne d'une très forte montée en fréquence de découpage. Ceci dote le convertisseur de propriétés nouvelles le rendant apte à asservir finement les tensions au sein d'un système. Il s'agit d'une fonctionnalité utilisée dans la gestion d'énergie des systèmes numériques.

À très haute fréquence de découpage, les contraintes technologiques posent des problèmes pour les solutions techniques analogiques. L'évolution vers une approche numérique (*digital control*) est apparue comme un des points essentiels.

Fig. 1 montre la structure générale d'une commande numérique pour un convertisseur abaisseur de tension.

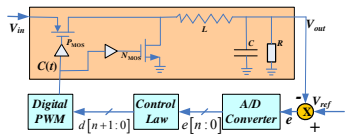


Fig. 1. Structure d'un convertisseur abaisseur à commande numérique

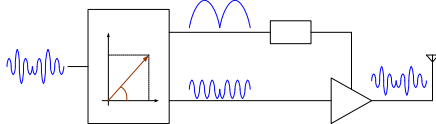


Fig. 2 : Principe de la construction polaire

Les contraintes de coût et consommation d'énergie a réduit le plus souvent l'algorithme de commande utilisé à un simple correcteur PID numérique. Un verrou consiste à élaborer des algorithmes de commande de complexité similaire à celle d'un correcteur PID tout en améliorant significativement les performances dynamique du système.

Fig. 2 présente le principe de la construction polaire où le signal analogique, classiquement émis à l'aide d'un amplificateur linéaire radiofréquence, est séparé en phase et en amplitude. L'enveloppe d'amplitude sert de tension de référence d'un SMPS à très large bande passante, et qui produit l'alimentation d'un amplificateur radiofréquence en classe D. Le rendement énergétique de l'étage d'émission est significativement augmenté. Les verrous concernent l'architecture du SMPS à haute fréquence de découpage (200MHz), l'intégration monolithique des filtres LC et les couplages CEM entre SMPS et le reste du système.

### COMMANDE ROBUSTE PAR PLACEMENT DE POLES

Dans les systèmes embarqués, les circuits passent souvent d'un mode de fonctionnement à un l'autre pour économiser l'énergie consommée. Ce qui implique un changement de point de fonctionnement brusque et un appel de courant important. Le convertisseur doit fournir un courant de sortie suffisant tout en gardant une bonne précision sur la tension de sortie. Nous avons proposé une démarche générique, réalisée hors ligne, permettant de concevoir un correcteur polynomial optimal de type RST prenant en compte des contraintes de robustesse tout en satisfaisant aux exigences de performances imposées par le cahier des charges sur l'ensemble des perturbations altérant la sortie [hal-00369454].

Le correcteur proposé nécessite un peu plus de ressources de calcul qu'un PID classique, mais assure des performances meilleures que celui-ci. On peut remarquer que les exigences de performances dépendent du mode de fonctionnement. En régime établi ou en mode de veille, un simple PID peut suffire pour garantir le bon fonctionnement du système. Afin de réduire la consommation d'énergie liée au calcul algorithmique pour les futures applications monolithiques, une commande à trois modes a été proposée : en mode transitoire, le correcteur RST est utilisé; en régime établi, le correcteur PID est appliqué; en mode de veille, un « quarter PID », qui a la même structure que le PID précédent, mais qui n'est rafraîchi que toutes les 4 périodes d'horloge. Cette commande permet d'assurer les performances dynamiques en régime transitoire tout en réduisant la consommation d'énergie en régime établi ou en mode de veille.

Un des verrous technologiques pour intégrer la commande numérique est la réalisation de DPWM (*Digital Pulse Width Modulation*). Il s'agit du bloc traduisant en temps de conduction la valeur numérique du temps de conduction des transistors MOSFET, telle qu'issue du correcteur numérique. Le défi concerne l'obtention d'une conversion précise (nombre de bits) sans l'usage de fréquence de calcul trop grande, synonyme de consommation excessive. Nous étudions deux solutions: une structure hybride (compteurs et *dithering*), et une structure sur le principe de modulation  $\Sigma-\Delta$ . Un gain de 256 sur la fréquence d'horloge numérique a déjà été démontré. Fig. 3 donne une illustration de la performance en sortie d'une DPWM  $\Sigma-\Delta$  associée à un PID numérique.

<sup>4</sup> Le groupe de travail comprend 3 permanents et 10 doctorants en moyenne, répartis sur diverses actions résumées ici en 4 parties. La section 5 couvre les aspects conduits en collaboration avec des fondeurs de semiconducteur (ST-Microelectronics, NXP).

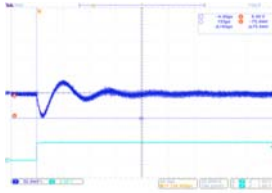


Fig.3: Variation de charge en sortie d'un SMPS 1MHz et variation de la tension de sortie ( $\Delta V < 40\text{mV}$ ,  $\Delta t < 10\mu\text{s}$  pour  $V_s = 1\text{V}$ )

La commande à trois modes a été testée avec les deux types de DPMW et testée sur FPGA avant passage à l'ASIC. Les résultats expérimentaux obtenus sont très encourageants et permettent d'étendre les solutions proposées pour un fonctionnement à très haute fréquence de découpage de convertisseur monolithique (CMOS).

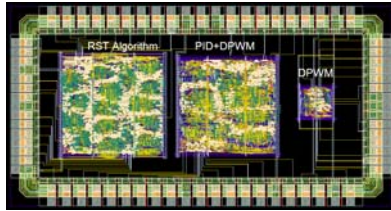


Fig.4: Layout en technologie standard CMOS 0,35  $\mu\text{m}$  de la commande à trois mode et les DPWM proposée

#### COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

Les SMPS sont des systèmes possédant un comportement discontinu. Il est donc judicieux d'appliquer des méthodes de réglage non linéaire et discontinu. L'approche par mode de glissement des systèmes à structures variables offre un avantage majeur : performance robuste en présence d'incertitudes dans le système. Son application aux structures simples de convertisseurs a montré son efficacité dans un certain nombre de publications. Pour la plupart des applications, l'implémentation de cette technique fait appel à des DSP et limite les fréquences de découpage au kHz.

L'utilisation d'un élément à hystérésis pour effectuer le glissement induit une fréquence de découpage variable du côté convertisseur. Une modulation PWM a été proposée pour garantir une fréquence de découpage fixe [1]. L'implémentation en est réalisée malheureusement en analogique pour un abaisseur de tension à 5kHz. En utilisant les DPWM introduites ci-dessus, nous avons élaboré une implémentation numérique, testée sur FPGA avec un convertisseur discret à 5MHz de découpage. Comme les performances de l'algorithme par mode de glissement croissent avec la fréquence de découpage, les SMPS monolithiques à plus de 100MHz devraient pouvoir bénéficier d'un contrôle efficace.

#### COMMANDE DIRECTE

Par sa structure, les SMPS peuvent être considérée comme une des classes des Systèmes à Dynamiques Hybrides (SDH) qui font intervenir explicitement et simultanément des phénomènes de dynamique continue (filtre) et événementielle (transistors). Nous avons initié une démarche de commande directe pour ces systèmes. Elle est basée sur une modélisation simplifiée, prenant en compte l'aspect discontinu de l'organe de commande, valable sur un l'horizon court de décision. Une stratégie de choix détermine directement les configurations de l'organe de commande sans passer par des techniques de modulation. Cette approche méthodologique a été appliquée avec succès aux machines tournantes [hal-

00291671] et aux convertisseurs de puissance multicellulaires [hal-00374698]. Le fait de faire la synthèse d'une commande au plus près des cellules de commutation présente un grand intérêt pour le contrôle des SMPS. Le verrou technologique de la réalisation de DPWM à très haute fréquence de découpage serait contourné. Reste à résoudre les problèmes d'observation des grandeurs non mesurables (pas de capteur implantable) et à élaborer des stratégies de décision prenant en compte l'optimisation énergétique de la commande.

#### ASPECTS ARCHITECTURES, CIRCUITS ET DISPOSITIFS

Les SMPSs monolithiques sont enfouis au sein de systèmes-sur-puce dont la diversité impose de rechercher des architectures optimales. Fig. 4 présente la puce correspondant au circuit de la Fig. 2. Au sein de ce système, le rendement maximal du SMPS est de 83% à 130MHz de découpage (puissance de sortie 2.5W sous 3.3V d'alimentation). Un effort de recherche concerne l'optimisation des architectures et des circuits en rendement, avec l'adoption de blocs non conventionnels comme une commande de grille résonnante (Fig. 5). Le gain en rendement global est de 5 points environ [hal-00410236].

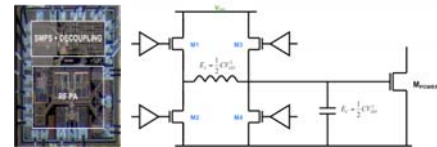


Fig. 5: Système-sur-puce radiofréquence avec un SMPS embarqué (gauche), circuit de principe d'une commande résonante de grille (droite).

L'intégration des composants passifs (inductance, capacité) est un verrou auquel le groupe travaille en synergie avec l'équipe *matériaux*. La contribution originale concerne l'introduction d'un matériau magnétique micro-onde. L'effort côté circuit concerne la géométrie de l'inductance par exemple. Au-delà de la technologie, des travaux concernent la fiabilisation des composants passifs dont la technologie (gravure profonde) fragilise les substrats. L'idée principale est d'introduire des structures sacrificielles d'absorption du stress thermo-mécanique [hal-00410237]. Fig. 6 présente la forme de structures expérimentées dans les coins d'une puce.



Fig. 6 : Structures sacrificielles appelées « seal-ring »

Enfin des actions ponctuelles de recherche concernent l'insertion de solution de gestion de tension et/ou d'énergie dans des dispositifs mémoires (SRAM, antifuse). Ces actions impliquent une réflexion au plus près des phénomènes physiques.

#### REFERENCES

- [1] S.C. Tan, Y. M. Lai and C. K. Tse, "General Design Issues of Sliding-Mode Controllers in DC-DC Converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1161-1174, March 2008

# 13. Vers une meilleure gestion de l'énergie dans l'habitat

E. Bideaux, E. Blanco, D. Eberard, G. Scorletti

**Résumé** — Cette activité vise à améliorer la maîtrise énergétique d'un bâtiment et de ses consommations. Cela passe par le développement de systèmes, de modèles et de commandes pour évaluer ces consommations et assurer un contrôle performant en termes de confort et d'énergie.

## I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est en France le plus gros consommateur d'énergie représentant 43 % de l'énergie finale totale et 25 % des émissions nationales de CO<sub>2</sub>. L'objectif est de diviser par 4 l'ensemble des consommations d'énergie dans le bâtiment d'ici 2050 à savoir les consommations pour les besoins en chauffage et ECS (objectif de 50 kWh/m<sup>2</sup>/an), la ventilation et l'électricité spécifique. Pour satisfaire ces objectifs, des sources d'énergies renouvelables vont devoir co-habiter avec les sources d'énergies conventionnelles. Ces sources doivent permettre de couvrir les besoins en énergie, cependant elles sont sujettes à des contraintes spécifiques en termes de puissance et de disponibilité. De plus, elles nécessitent un investissement économique conséquent pouvant limiter leur rentabilité. L'enjeu est alors double, puisque économique et écologique. L'utilisation des énergies renouvelables pose donc trois problèmes : le premier est le choix des systèmes, le second est leur dimensionnement, le troisième est celui de leur contrôle et plus globalement du contrôle de l'ensemble du bâtiment. Ce contrôle doit permettre de profiter au mieux des apports passifs, d'adapter la contribution de chacune des sources en fonction des besoins, de la disponibilité de l'énergie, de son coût tout en respectant le confort des occupants. Pour répondre à ces problèmes, nos investigations se sont portées en premier sur la caractérisation d'un bâtiment à différentes échelles de temps pour la mise en forme de modèles adaptés, puis vers la définition des stratégies de contrôle assurant le respect du confort des occupants.

## II. DEVELOPPEMENT

Actuellement, le dimensionnement des systèmes énergétiques s'appuie sur des procédures empiriques fournissant un diagnostic plus ou moins approximatif des consommations. Cette absence de modèle explicite a souvent conduit à sous ou sur dimensionner les équipements installés. Les techniques actuelles de contrôle dans le bâtiment sont aussi des approches sans modèles (correction empirique, régulateur flou). Ces approches offrent une grande flexibilité, un paramétrage rapide mais elles ne permettent pas de garantir la performance notamment en terme de confort et d'énergie. Les développements de modèles menés en ce sens et leurs exploitations pour une meilleure gestion sont présentés ci-après.

### A. Diagnostic Énergétique et aide au Dimensionnement

Ce travail a débuté par le développement de modèles énergétiques permettant de prédire les consommations mensuelles pour le chauffage/refroidissement des habitations. A partir de méthodes de régression appliquées à une importante base de données constituée de résultats de simulation du comportement thermique en transitoire de bâtiments, nous avons développé des modèles thermiques

paramétrables qui permettent d'optimiser la morphologie des bâtiments, l'isolation thermique, l'inertie thermique ou la surface vitrée afin de réduire au maximum les consommations d'énergie d'un habitat. Le dimensionnement des sources d'énergie se fait au moyen d'une analyse multicritères afin de réaliser une optimisation globale au regard de critères énergétiques, économiques et environnementaux (temps de retour sur l'investissement, le gain environnemental exprimé en tCO<sub>2</sub> évitées, etc). La méthode d'aide au dimensionnement développée permet ainsi d'envisager des solutions « hybrides » comportant plusieurs sources d'énergies sur un même site.

### B. Contrôle du Bâtiment.

Des modèles dynamiques de type boîte grise ont été développés pour modéliser le comportement thermique d'un habitat. Ils permettent de ne conserver que les éléments déterminant dans l'évolution des paramètres physiques caractérisant l'habitation et la notion de confort. Concernant le confort thermique, il a été montré à l'aide d'une stratégie de type commande optimale qu'il était possible d'obtenir une très bonne gestion des relances de chauffage (bâtiments à inertie faible ou moyenne) et des gains notables (à confort égal : 10 à 25% de réductions des besoins, à consommation égal : amélioration significative du confort).

### C. Confort visuel.

Un autre aspect de la réduction de la consommation d'énergie dans l'habitat concerne le confort visuel des occupants en fonction de la tâche réalisée, en particulier dans le tertiaire. Cet aspect est naturellement fortement couplé aux aspects thermiques de part les apports importants au travers des surfaces vitrées. Les premiers travaux ont permis de développer une instrumentation innovante permettant de mesurer plusieurs critères de confort visuel (selon les normes en vigueur) et d'extraire un indice de confort, puis de mettre en œuvre la régulation d'une ambiance visuelle tout en minimisant la consommation d'énergie. Au départ ne considérant que le cas mono-façade, ces travaux sont aujourd'hui étendus au cas multi-façade et intègrent également le couplage avec le confort thermique. Des expérimentations sont menées dans une salle de type open-space équipée de stores vénitiens motorisés et de luminaires pilotables en intensité.

## III. SOUTIENS ET PARTENARIATS

Ce thème, apparu en 2005 suite à une collaboration avec le CETHIL, se développe dans le cadre de différents projets :

- Projet IRH (Porteur) : 2 thèses (axes II.A et II.B), soutenu par le Cluster 7 (« Energie ») de la Région Rhône Alpes.
- Projet MIGRER : ANR PREBAT, labellisé par le Pôle de Compétitivité TENERDISS, soutenu par l'ADEME
- Partenariat SHERPA Engineering : 2 thèses CIFRE (II.C) en lien avec le Pôle de Compétitivité Cap Energie (PACA)..

## REFERENCES

hal-00403451, hal-00368363, hal-00374677, hal-00374586, hal-00368284

## 14. Estimation paramétrique et capteurs logiciels

E. Blanco, X. Brun, X.F. Lin-Shi, M.T. Pham, J.M. Rétif, M. Smaoui, G. Scorletti, D. Thomasset, H. Yahoui

**Résumé**—Cette activité vise un double objectif : développer des méthodes adaptées d'estimation et d'observation pour des applications phares d'Ampère : diagnostic et commande de systèmes électriques, commande des systèmes électropneumatiques, robotique et développer des méthodes générales d'estimation et d'observation en prenant explicitement en compte l'incertitude ou le caractère temps variant non linéaire des systèmes.

### INTRODUCTION

Les applications développées dans les Activités 12, 16, 19 et 20 nécessitent des procédures d'identification et de conception d'observateurs (ou capteurs logiciels) dans un contexte non linéaire, incertain ou encore hybride. Les enjeux théoriques sont majeurs et multiples : de nombreux problèmes sont et probablement resteront ouverts dans leur généralité. Il est donc nécessaire d'explorer l'application des méthodes générales les plus avancées tout en contribuant parallèlement au développement de celles-ci. Une telle approche recherche des effets synergiques entre pratique et théorie. Parmi les développements généraux possibles, l'activité s'est focalisée sur ceux reposant sur des thèmes transversaux aux activités d'Ampère : incertitude (désensibilisation, robustesse) et optimisation. Ces enjeux théoriques recoupent ceux de l'Activité 18.

### DEVELOPPEMENT DE METHODES ADAPTEES

Les différentes structures d'observateurs sont les observateurs par modes glissants d'ordre supérieur, adaptatif ou non et les observateurs grand gain.

#### A. Capteurs logiciels pour les systèmes électropneumatiques

Ces travaux concernent la conception de capteurs logiciels pour les systèmes mécaniques actionnés par des fluides sous pression. Les structures avancées de commandes en position nécessitent généralement, en plus des capteurs de position, des capteurs de vitesse et d'accélération. Cependant, ces derniers sont souvent 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. Bien que la dérivation numérique soit un problème classique en automatique ou en traitement du signal, cela ne s'est pas traduit par le développement de capteurs logiciels adaptés, notamment pour la commande de systèmes électropneumatiques. Les travaux ont porté sur la dérivation par observateurs par modes glissants d'ordre supérieur avec test en co-simulation et expérimental sur un système électropneumatique et comparaison à des méthodes de dérivation classique [hal-00258083, hal-00374685]. Ces travaux se poursuivent actuellement par une étude plus exhaustive des méthodes de dérivation et le développement de l'intégration temps réel. Plus généralement, les travaux de l'équipe portent sur la mise en œuvre des observateurs non linéaires (grands gains et modes glissants) pour la commande de systèmes électropneumatiques [hal-00374675]. L.

La dérivation est également étudiée pour l'identification des paramètres de modèles non linéaires physiques de systèmes électropneumatiques et mécatroniques comprenant les systèmes robotiques. Elle permet de se ramener à la résolution de problèmes de moindres carrés.

#### B. Capteurs logiciels pour les systèmes électriques

L'équipe commande développe des structures de commande de convertisseurs prenant explicitement en compte le nombre fini de valeurs que le signal de commande peut prendre. Ces structures nécessitent l'estimation de tensions et intensités au sein du convertisseur. Des observateurs adaptatifs ont été récemment développés en collaboration avec l'équipe ECS de l'ENSEA et testés expérimentalement.

#### C. Diagnostic des systèmes électriques par observateur

Ces travaux portent sur la conception de capteurs logiciels pour l'estimation de grandeurs significatives d'un défaut dans une machine asynchrone dans un but de diagnostic. La démarche repose sur la connaissance de l'ensemble des phénomènes physiques régissant le fonctionnement du système et sur la construction d'un modèle analytique avec défaut (voir Activité 20). Un observateur a été développé en collaboration avec le LAGEP et testé expérimentalement.

### DEVELOPPEMENT DE METHODES GENERALES

Des méthodes générales de conception d'observateurs abouties et 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 (ou incertitudes) faibles (désensibilisation) ou important (robustesse) entre le modèle et le système observé. Le problème de conception change ainsi de nature (d'algébrique, il devient topologique). En désensibilisation, les travaux réalisés s'appuient sur des approches polynomiales [hal-00358890, hal-00373793].

La prise en compte de la robustesse bénéficie des progrès récents en commande robuste. Plus généralement, les progrès en conception de correcteurs permettent de traiter de spécifications de performance plus fines voire de prendre en compte certains effets non linéaires. Une première exploration a été faite dans [hal-00374670, hal-00373798], en collaboration avec l'équipe EMMAH de l'INRA.

La difficulté majeure de la prise en compte de l'incertitude lors de la conception est la complexité algorithmique intrinsèque. Une approche maintenant établie est de les relaxer par des problèmes d'optimisation convexe. Le choix des relaxations résulte d'un compromis entre la complexité algorithmique de la méthode et les possibilités qu'elle offre.

Une telle approche a été appliquée pour l'identification de modèles pour la commande [hal-00347166] à travers une collaboration avec l'équipe DCSC de l'Université de Delft. 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. Ceci se prolongent par le développement de méthodes de conception d'observateurs prenant en compte explicitement l'incertitude et la performance.



# 15. Méthodes numériques et outils pour la modélisation électromagnétique

L. Krähenbühl, L. Morel, A. Nicolas, L. Nicolas, R. Perrussel, F. Sixdenier, D. Voyer

**Résumé**—Une part importante de l'activité de l'équipe "Modélisation" est tournée vers des activités génériques liées à la modélisation numérique des phénomènes électromagnétiques, dans des dispositifs du génie électrique et dans le corps humain. Les défis à relever sont ceux de toujours – plus de précision et plus de rapidité de calcul – en prenant mieux en compte la réalité du monde, où toutes les données ne sont pas connues exactement, et où le vrai problème est souvent celui de la conception plus que celui de la seule analyse.

## CONTEXTE

La connaissance précise et localisée des grandeurs électromagnétiques (champs, courants, SAR, densité de force, ...) nécessite le plus souvent la résolution par méthode numériques (éléments finis ou autres) des équations de Maxwell, complètes ou non, prenant en compte les propriétés des matériaux et la géométrie précise des dispositifs (dimensionnement général, et détails les plus fins lorsqu'ils jouent un rôle sur la grandeur d'intérêt).

Malgré le recul des années, il apparaît indispensable de perfectionner les *modèles numériques du comportement électromagnétiques de certains matériaux* comme les composites, mais aussi de matériaux plus traditionnels (tissus vivants, matériaux ferromagnétiques, avec des fréquences de plus en plus élevées et des signaux non sinusoïdaux ou impulsionnels, ...).

L'amélioration de la précision de description (matériaux et détails géométriques) conduit à augmenter la *taille des problèmes à résoudre*, au point que la limite des calculateurs est souvent atteinte ; un effort de recherche important porte de ce fait sur des familles de méthodes permettant d'alléger la résolution des gros problèmes sans réduire la précision.

Certaines des données utilisées par les modèles numériques (par exemple, la conductivité d'un tissu vivant à une fréquence précise) sont *mal connues*, ou peuvent évoluer avec le temps : nous travaillons à la prise en compte de ces incertitudes, en caractérisant l'incertitude résultante sur les résultats des calculs et, dans le cas de l'optimisation, en recherchant des extrema robustes.

L'appropriation et l'adaptation de *méthodes d'optimisation* à nos problèmes spécifiques, processus non trivial, permet d'utiliser ces simulations numériques lourdes en lien avec des processus de conception.

## THEMATIQUES TRAITEES

1. Phénomènes microscopiques complexes à prendre en compte efficacement à plus grande échelle :

- phénomène *réparti*, par exemple un amas de cellules biologiques considéré comme un tissu dont il faut déterminer les propriétés homogènes, ou plus généralement une *structure composite remplacée par un milieu continu équivalent* (y compris les milieux ferromagnétiques laminés ou non, et leurs pertes) : *homogénéisation*. Il faut également développer les méthodes qui permettent, à partir de la solution homogénéisée, de retrouver le vrai comportement local [hal-00359372, hal-00082778].
- phénomène *local* comme une *singularité géométrique* (angle vif, milieu mince, trou dans un milieu mince, ...) : fonctions spéciales [hal-00082800], (petites) *perturbations*

[hal-00179242], méthodes *asymptotiques* [hal-00360339] ;

2. Traitement numérique de « gros » problèmes :

- travail direct sur la « grosse » matrice obtenue : méthodes *multigrilles* [hal-00111256] ;
- décomposition en sous-problèmes de tailles réduites : *décomposition de domaines* [inria-00155231], méthodes multi-échelle [hal-00359226], méthode des (grosses) *perturbations*, réduction de dimensions (résultat 3D comme combinaison de résultats 1D/2D/axi avec un problème 3D de petite taille) [hal-00359393].
- décomposition système (par exemple par passage partiel ou total à une méthode de *réductances*) [hal-00312919].

3. Propriétés et paramètres imparfaitement connus, et étude de leurs effets probabilistes sur les résultats des calculs numériques : travaux sur la *variabilité* par des méthodes stochastiques [hal-00164652].

4. Passer des outils d'*analyse d'un dispositif connu* à l'*optimisation de ce dispositif* pour un ou plusieurs objectifs. Optimisation *robuste* (prenant en compte la variabilité, ou la sensibilité aux variations des paramètres [hal-00111247]) , intégration de ces calculs d'optima dans un processus de *conception* [hal-00359194]. *Problème inverse, identification* [hal-00358856].

## COLLABORATIONS

Ces sujets sont au cœur de conférences internationales comme Compumag et CEFC, ou continentales comme Momag (Amérique Latine), Numelec, IGTE Symposium ou OIPE (Europe). Ampère y tient toute sa place (plus de 20 présentations en 2008), grâce aussi à ses nombreuses collaborations :

- ICJ (Lyon), INRIA (Sophia, Bordeaux) : aspects mathématiques (multigrille, asymptotiques, singularités) ;
- G2ELab et GDR Seeds (socle méthodes et modèles) : optimisation et conception, méthode des réductances ;
- Université de Liège (Institut Montefiore) : mises en œuvre par éléments finis (homogénéisation, asymptotiques), méthodes de perturbation ;
- Brésil (Universités Fédérales de Minas Gerais, de Santa Catarina et Université de São Paulo) : méthodes multigrilles, variabilité, méthodes d'optimisation.
- Sous l'égide du CNRS et du CNPq (Brésil), Ampère, G2ELab et ces 3 partenaires brésiliens ont créé en 2009 le **Laboratoire International Associé James Clerk Maxwell**. Le noyau du projet scientifique du *LIA Maxwell* est constitué de ces questions génériques de modélisation numériques pour l'électromagnétisme.

# 16. Control of Fluid Power systems

X. Brun, M. Di Loreto, M. Smaoui, S. Sesmat, D. Thomasset

**Abstract—** Démarrée il y a une vingtaine d'années cette activité a un double objectif :

- Adapter, mettre en oeuvre et comparer (à l'aide de critères de performances, économiques...) sur des dispositifs d'actionnement à fluide (air ou huile) sous pression les commandes "modernes", issues de la partie plus théorique de la communauté automatique mondiale.
- Permettre à l'équipe Commande et au laboratoire Ampère d'acquérir une expertise et d'avoir une position reconnue internationalement dans le domaine de la commande des systèmes fluides : via le réseau Fluid Power Centres in Europe ([www.fpce.net](http://www.fpce.net)) et par le biais des congrès internationaux orientés Fluid Power.

## INTRODUCTION

La commande des systèmes Fluid Power est une activité originale au laboratoire Ampère et en France. En effet il s'agit là d'une niche scientifique et technologique sur laquelle s'est positionnée le laboratoire depuis le début des années 1990. Ceci s'est traduit successivement par des thèses sur la commande à gains variables, la commande non linéaire linéarisante, la commande adaptative, la commande par sliding mode d'ordre un, la commande utilisant le concept de platitude et la commande par backstepping, avec pour soucis d'adapter ces différentes stratégies sur des bancs d'essais prototypes ou industriels.

## DEMARCHE

Lors de ce quadriennal des techniques de commande par modes glissants d'ordres supérieurs, des techniques utilisant les systèmes réels strictement positifs (SPR) et des techniques dites de commandes sans capteurs ont été principalement étudiées.

La démarche générale adoptée est la suivante :

- dans un premier temps les modèles développés par l'équipe Actionneurs et Systèmes sont utilisés en simulation et analysés à fin d'obtenir des modèles réduits.
- dans un second temps les techniques de commandes sont adaptées sur le modèle retenu et mises en œuvre en co-simulation, cette technique permet d'utiliser le logiciel adéquat pour la simulation (AMESim par exemple) et pour la synthèse de commande (Matlab/Simulink ici). La figure 1 présente un exemple de cosimulation concernant le système présenté figure 2

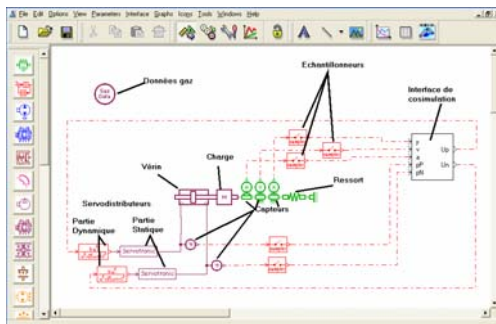


Fig.1. Banc d'essais virtuel de cosimulation

- une fois le pré-réglage effectué en simulation sur les consignes issues du cahier des charges, les commandes sont intégrées sur calculateur (carte de prototypage rapide

type dSpace) et testées sur un banc d'essai développé en parallèle de cette démarche. Les réglages sont affinés pour obtenir le meilleur compromis entre les différentes performances fixées par un benchmark de type industriel.

- l'étape suivante consisterait à développer l'électronique intégrée adéquate pour faire fonctionner les différentes stratégies développées sur composants spécifiques. Cette étape est maîtrisée au laboratoire (voir fiche Commande et gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée) et devra être adaptée au contexte des systèmes Fluid Power.

Ces travaux à caractères méthodologiques et appliqués ont permis de développer des systèmes originaux concernant les domaines d'applications privilégiés de l'équipe Commande et du Laboratoire Ampère:

- Aéronautique : collaboration IRCCyN et DGA, thèse DGA [hal-00207714]
- Transport terrestre : collaboration avec Volvo Powertrain, thèse CIFRE [hal-00375309]
- Robotique médicale : collaboration Hospices Civil de Lyon [hal-00267771]

## RESULTATS

Ces différents projets menés lors de ce quadriennal ont permis d'étendre nos connaissances et donc nos compétences en terme de lois de commandes maîtrisées par le laboratoire. Notre volonté et positionnement original au niveau des communautés nationales et internationales Fluid Power et Automaticienne étant d'avoir une expertise riche en termes de commandes des systèmes Fluid Power. Ainsi nos études amonts ont pour but d'adapter les stratégies de commandes sur les systèmes Fluid Power en fonction des problèmes à résoudre. Les verrous scientifiques à ce jour concernent essentiellement la consommation énergétique, les problèmes de redécollage, les problèmes de mauvaises répétitivité.

Pour atteindre ce but nous devons sans cesse enrichir d'une part le « catalogue » de lois de commandes testées et d'autre part renseigner les différents objectifs fixés par benchmark en terme de spécifications temporelles, fréquentielles et énergétiques. Ceci dans l'objectif de pouvoir spécifier quelle loi de commande utilisée en fonction de l'objectif spécifié.

### A. Commandes par modes glissants d'ordres supérieurs

Le problème très connu de la commande par mode glissant concerne le phénomène de broutement (ou réticence) plus connu sous le nom de « chattering », observé lorsque la sortie du système rejoint la surface de glissement et oscille dessus à fréquence infinie en théorie, fréquence limitée par la fréquence d'échantillonnage en pratique. Ce phénomène a pour conséquences l'usure prématurée du modulateur de puissance voire de l'actionneur, l'excès de consommation énergétique et l'excitation de fréquences qui peuvent s'avérer néfaste pour l'ensemble du système. Ainsi une solution classique retenue expérimentalement consiste à utiliser un seuil sur la commande qui en théorie fait perdre les aspects de robustesse propre à cette technique, et en pratique entraîne une erreur statique. Une autre solution plus complexe mais

plus efficace consiste à utiliser des algorithmes de modes glissants d'ordre supérieur. Cette technique étudiée au laboratoire [hal-00258083], a été adaptée dans le cadre d'un projet avec la DGA [hal-00207714], pour le positionnement des gouvernes de missiles. Cette étude effectuée en collaboration avec l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR 6597) et commanditée par la DGA a mis en évidence l'intérêt d'une telle technique de commande par rapport à une commande par gains variables, pour le benchmark donné ([hal-00207663], [hal-00207699], [hal-00373588], [hal-00207702]). Elle a permis aussi d'alimenter des problématiques à ce jour étudiées par l'équipe Commande, comme par exemple le développement d'observateurs d'état (étendu ou non) utilisant uniquement un capteur. La figure 2 présente le banc d'essai conçu pour tester et valider les lois de commandes développées.

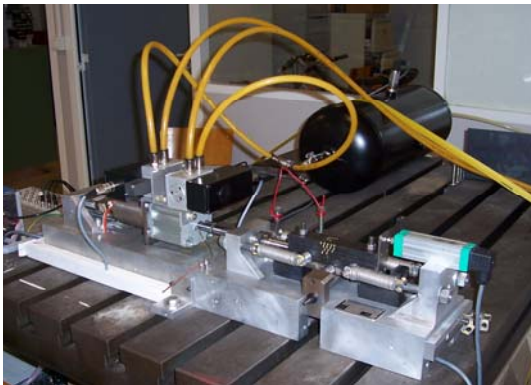


Fig.2. Banc d'essais de commande de gouverne d'objets volants

#### B. Commande sans capteurs

L'objectif ici est l'étude de la commande d'actionneurs électropneumatiques soumis à de fortes perturbations (Projet PEPS CNRS déposé en janvier 2009), le but étant d'observer la perturbation inconnue dans un contexte aéronautique, par exemple, en utilisant le minimum de capteur. L'utilisation de commandes non linéaires robustes étant une solution, la connaissance de l'état est indispensable, impliquant un nombre élevé de capteurs. Cette étude doit permettre le développement de commandes hautes performances sans capteur (soit mécanique, soit de pression) qui utiliserait des observateurs pour reconstruire les informations manquantes [hal-00374685].

#### C. Utilisation des propriétés des systèmes réels strictement positifs (SPR) et étude du redécollage

Depuis 2007, dans le cadre d'une thèse en cotutelle avec l'université de Sfax des travaux ont permis de proposer une nouvelle méthode d'étude de la stabilité du point d'équilibre lors de la mise en œuvre d'une commande non linéaire robuste pour un suivi de trajectoire de position. De plus, une stratégie commutant cette commande en suivi de position et des régulations de pression ont apporté une solution au phénomène de redécollage du piston dû aux équilibres partiels obtenus sur de tels systèmes [hal-00374709].

## DEUX AXES EMERGENTS

### A. Commande des systèmes hydrauliques

L'expérience acquise dans le domaine des systèmes électropneumatique nous a permis lors de ce quadriennal de commencer une nouvelle thématique de recherche dans le cadre des systèmes Fluid Power : la commande des systèmes électrohydrauliques (commande avec modèle), pour se faire un banc électrohydraulique hautes performances (accélérations, précision, micro déplacement, bande passante...) a été dimensionné, conçu et mis au point (cf. figure 3).



a/ Vue d'ensemble

b/ Servo vérin

Fig.3. Banc d'essais électrohydraulique

A partir des hypothèses classiques utilisées en modélisation un premier modèle de simulation a été établi puis a permis de tester des premiers algorithmes classiques de simulation. Actuellement nous travaillons parallèlement au développement de modèle plus fin prenant en compte les non linéarités au niveau des servodistributeurs et de l'embase utilisés. Ces travaux nous permettent de mieux connaître le système et de tenir compte de ces particularités pour la synthèse de commandes avancées. Des collaborations au niveau institutionnelles (Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse) et industriels (société Moog) se mettent en place.

### B. Commande des systèmes Fluid Power hybrides

Par sa structure, un système Fluid Power actionné par des distributeurs peut être considéré comme une des classes des Systèmes à Dynamique Hybride (SDH) qui font intervenir explicitement et simultanément des phénomènes de dynamique continue (vérin) et événementielle (distributeurs tout ou rien 5 à 10 fois moins chers en lieu et place des servodistributeurs). Cet axe étudié au sein du laboratoire [hal-00179487] avait montré que les performances étaient fortement limitées par la dynamique des distributeurs. Le développement récent de composants plus rapides et modulables laisse entrevoir de nouvelles possibilités, notamment en terme de performances atteignables. Actuellement les débits massiques délivrés par ces distributeurs sont limités c'est pourquoi nous nous dirigeons sur des applications peu contraignantes en terme de dynamique. L'expérience acquise au niveau de la commande de systèmes électropneumatiques dans le cadre de la robotique médicale ([hal-00258088] et [hal-00267771]) va nous être utile dans le cadre du développement d'interfaces haptiques à six degrés de liberté pour l'apprentissage d'un geste médico-chirurgical. Le prototype en cours de développement utilisera des distributeurs rapides qui piloté par une stratégie adéquate de commande hybride devra répondre au cahier des charges.



# 17. Fluid power and power transmission systems: multi-scale and multi-physic modelling

*E. Bideaux, D. Eberard, S. Sesmat*

**Abstract—** This research activity tackles theoretically as well as experimentally the modelling of multi-energy power transmission systems, and particularly when a fluid energy is involved. The modelling of Fluid Power systems is a nationwide original research activity of the Ampère laboratory. On the theoretical side, a unified and structured approach of the modelling of multi-physic and multi-scale systems (Bond Graph) is developed. This approach aims at preserving the characteristic energetic behaviour of physical phenomena in the mathematical model before any step of space and time discretization. Simulation aspects are also addressed: methods of global optimization of a component or a circuit, taking into account the reciprocal interactions between control and flow, are investigated. These methods are based on the coupling of fluid mechanics and system dynamics numerical codes. On the experimental side, with a strong link with industry, the expertise acquired on the pneumatic technology is reinforced. In this context, new characterization procedures and equipments are studied and implemented, e.g. characterization of mass flow rate in components, heat transfer in energy storages such as tanks and cylinders.

## INTRODUCTION

This research activity is part of the fluid power and robotics scientific priority of the laboratory. It has a naturally strong links with the control activity [Fiche 16] and relies on the Fluid Power Lab facilities for the experimental aspects. The study of power transmission using a fluid (oil, water or gas) is named Fluid Power by the scientific community. It constitutes the counterpart to electrical power transmission to cope with a major research problem nowadays: the design of energy efficient systems. The Ampère laboratory is on this point, unique in France since it has a recognized expertise of all these technologies for power transmission. This specificity is essential with regards to the previous economic and scientific issues.

However the research aspects developed here mainly focus on fluid power, since 2007, research works have been carried on the combination of electrical drives and power transmission [Projets FUI HyBus, CIFRE Volvo Powertrain]. Recently very original research projects have been initiated (e.g. the development of a pneumatic-electric battery with pneumatic, electric, and mechanical power outputs). The main originality relies on the use of bond graph for systems modelling and analysis with a unified approach based on the energy conservation principles. Complex models have been developed in the context of automotive industry such as power transmission in hybrid vehicles [hal-00202727], breaking systems, or vehicle dynamics [hal-00140637, 00140638, 00140639, 00373596, these-Sylvain Renard, 2008]. These works are part of projects in the competitiveness pole LUTB (Lyon Urban Trucks & Bus).

## C. National and international Fluid Power community

Research in Fluid Power consists in the study of the power transmission and the motion control when the medium used is a fluid. These works focus on components (pumps, motors, valves, etc) but also on systems, and it has still an essential role in industry (automotive, railway and naval industries, aeronautics, civil engineering).

This activity is mainly developed in Europe northern countries, Japan, China and the United States. In France, the industry is more concerned in systems than in components, and only a few laboratories have a research activity in this field. Ampère is the only French laboratory of the European network (Fluid Power Centres in Europe – [www.fpce.net](http://www.fpce.net)) built around the 9 main research institutes in this field. Our expertise, in pneumatics particularly, is world-wide recognized and our group is part of the scientific committee of several conferences and journals, but also advises the French representation at the ISO meetings for some topics related to this field.

## A. Scientific issues

By essence multi-disciplinary or mechatronic systems, Fluid Power components or circuits have to face to the energy efficiency problem, therefore the main scientific issues are design, control and reliability. The modelling of those systems is a key aspect in order to answer to the previous points. One of the main difficulties is to take into account the effects of different domains (mechanics, fluid mechanics, thermodynamics, electro-magnetism, etc.) and different scales (local and macroscopic).

## B. Originality of the research done at Ampère

The specificity of research is to deal with multi-disciplinary aspects on the theoretical viewpoint as well as on the experimental side. In the following sections, the first presented aspect focus on the development of a new approach for modelling multi-scale models. The second aspect aims at implementing an efficient coupling of the numerical flow simulation to macroscopic approaches. Finally, the last proposed aspect is illustrating our work on new procedures to characterize experimentally thermal effects and compressible flows.

## ILLUSTRATION OF THE RESEARCH WORKS

## A. Structured modelling and multi-scale systems

Models of Fluid Power transmission systems have to represent complex behaviour described by non linear equations of infinite dimension with strong interaction between local and macroscopic scales. In this domain, computation time is still high. Local phenomena such as turbulence, cavitation, or shock waves have influence on the performances at the macroscopic level (for example, turbulence may influence the stability of a piloted poppet).

At the system level, the representation of this kind of

relation is more important than the characterization of these phenomena in any point of space. To describe these interactions, we use a representation based on boundary energy flow using port variables. It relies on a geometric structure, called a Stokes-Dirac structure, which encodes a relation between internal dynamics and boundary exchanges (1), in a power-conserving manner (Fig.1). The main interest of this approach is that the mathematical structure is preserved. It allows an easier interconnection of sub-models, multi-domain modelling, mixing conservative and irreversible processes and structure analysis (controllability, observability, inverse methods, passivity).

This work, initiated in 2007, has already successfully been applied to the modelling of a compressible fluid flow [hal-00375766]. Beyond the multi-scale modelling, which can be applied to other domains such power electronics (supercapacitors) or microbiology, Bond Graph causality concepts are also studied in order to develop new methods to efficiently reduce complex multi-scale models according to boundary conditions or physical hypotheses or chose appropriate discretization schemes (Whitney elements). Our objective is here the development of new algorithms or methods for system simulation and analysis.

$$\begin{array}{c} e_b \quad f_b \\ \downarrow \quad \uparrow \\ e_p \quad f_p \quad \text{DTF} \quad f_q \quad \text{SGY} \quad e_q \quad f_q \end{array} \quad \int_Z (e_p \wedge f_p + e_p \wedge f_p) + \int_{ZZ} e_b \wedge f_b = 0 \quad (1)$$

Fig. 1: Decomposition of a Stokes-Dirac structure.

#### B. System optimization with parameterization in CFD

As it was previously introduced, the modelling of Fluid Power systems or components can quickly become very complex, requiring an extensive experimental approach when accurate virtual prototypes are studied. Although it could seem an obvious fact, design or optimization of these components has to be handled looking simultaneously at the adequate performances in stationary and in dynamic conditions, in other words at local and macroscopic levels.

In the design of fluid power components or systems, Computational Fluid Dynamics (CFD) can play a key role for flow optimization, but also in the performance analysis of a whole system. To study the sensitivity of flow to parameter changes, a solution would consist in computing the flow using CFD considering all the possible configurations. But this rapidly leads to a large number of combinations and the computational time required by 3D simulations still constraints the possibility of varying the necessary number of design parameters [hal-00375899, 00410246].

In the framework of the LUTB project CINEMAS<sup>2</sup> [Project FUI CINEMAS<sup>2</sup>], we apply a novel approach based on the parameterization of the CFD computed solution. It consists in the calculation of a polynomial approximation of the complete Navier-Stokes equations around a reference point according to small variations of some parameters or of boundary conditions. This method seems particularly efficient in order to take into account changes of the geometry (or boundary conditions) and makes easier the coupling of local approaches to macroscopic system simulation (Fig.2), avoiding a time consuming numerical scheme. The parameterization method developed here can give all the results corresponding to a continuous variation of the design parameters from one single design step, which means one single flow computation on one single mesh.

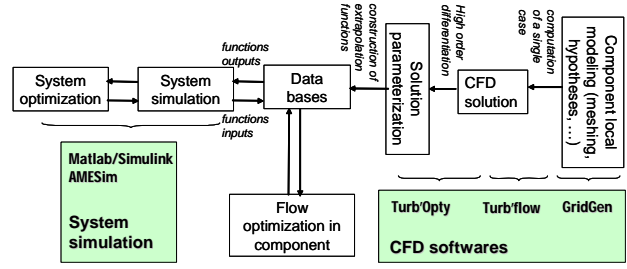


Fig. 2: Parameterization in CFD for system simulation and optimization.

#### C. New experimental procedures in pneumatics

Complementary to the previous approaches, our research group has developed a strong experimental knowledge of this technology, crucial in relation with industry.

Since 2006, we have proposed, in the framework of the ISO<sup>8</sup>, new experimental procedures for the characterization of pneumatic components [hal-00374356, 00375518]. The proposed method relies on the discharge or the charge of a tank in order to identify the mass flow rate through a component. This identification procedure requires naturally a good knowledge of the thermal transfer. Therefore, a convection model has been developed but also, an experimental procedure to identify the thermal parameters [hal-00375832, 00375542, 00375825, these-Rosario de Giorgi, 2008]. Good results have been obtained and this allows a wide range of application to be explored now as the development of new equipments, or the improvement of the energy efficiency of those systems. A first application of these results is the optimization of the pneumatic energy storages for truck breaking systems in collaboration with Volvo Trucks [Proj-Volvo].

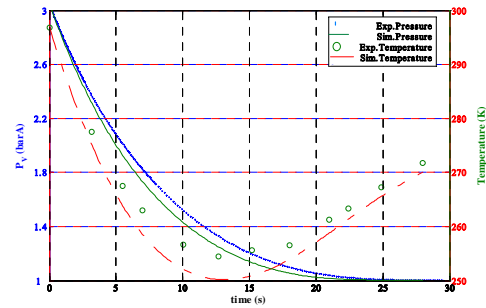


Fig. 3: Simulated vs. measured pressure and temperature for a tank discharge.

#### CONCLUSION

Beyond our multi-disciplinary approach for the modelling of power transmission system, the originality of these works relies mainly on the continuity between theory, virtual prototyping and experimentation. This expertise plays a crucial role in the quality of our research and its application in industry.

<sup>8</sup> International Standard Organisation

# 18. Méthodes et Outils d'Analyse Structurale et Comportementale des Systèmes physiques pour la Conception et la Commande Robuste

E. Bideaux, M. Di Loreto, D. Eberard, L. Krähenbühl, W. Marquis-Favre, R. Moreau, G. Scorletti, J.-P. Simon, D. Thomasset

**Résumé**—L'objectif de cette activité de recherche est le développement théorique et méthodologique d'outils pour l'étude et la caractérisation de propriétés intrinsèques et génériques d'une large classe de systèmes physiques multi-domaines. Ces travaux abordent de nombreuses problématiques d'ingénierie liées, entre autres, à la conception de ces systèmes, comme le choix technologique, la sélection de composants, la synthèse d'architecture d'actionnement, la synthèse paramétrique, la synthèse de tolérances sur les paramètres, ou l'analyse de structure de lois de commande. La finalité de ces recherches est d'énoncer des règles simples et utilisables dans un contexte industriel. L'originalité des travaux de cette activité se situe en particulier au niveau des outils utilisés se basant sur les principes de conservation d'énergie (bond graph), sur l'inversion de modèle, sur les approches algébrique, analytique et entrée/sortie, sur l'optimisation et sur l'approche opératoire en dimension finie et infinie.

## INTRODUCTION

Cette activité de recherche vise le développement et la démonstration théorique de méthodologies permettant la détermination de propriétés intrinsèques et génériques de systèmes physiques multi-énergies. Les domaines d'application visés sont multiples et couvrent par exemple la mécanique, les composants de stockage électrique [fiche 11], ou les systèmes à fluide sous pression [fiche 17]. Les problèmes abordés par cette activité se situent en amont des activités portées par l'équipe Commande [fiche 16], en s'intéressant davantage aux propriétés structurales et comportementales des modèles établis avant toute simulation numérique ainsi qu'à la structuration des modèles en vue de résoudre des problèmes de différentes natures.

## DEVELOPPEMENTS SCIENTIFIQUES

La **stratégie de recherche** comporte trois phases :

- identification d'un verrou applicatif [fiche 17, fiche 11] et recherche d'une solution,
- formalisation générique et démonstration théorique de la solution,
- déploiement applicatif des résultats et transfert méthodologique (notamment spécification logicielle).

L'**originalité** des outils théoriques adoptés réside dans la maîtrise et le couplage de la modélisation inverse, du langage bond graph, de l'optimisation et des approches algébrique, analytique et entrée/sortie de l'automatique.

### A. Analyse structurale et inversion pour la conception robuste

Le laboratoire est sur ce point un leader international reconnu. En particulier, l'approche par modèle d'état inverse doit constituer la prochaine rupture méthodologique en conception industrielle. Elle rompt en effet avec l'approche classique du jeu essai/erreur/correction en ingénierie augmentant le processus itératif sans garantir la pertinence du résultat car elle nécessite une connaissance *a priori* de ce qui est à déterminer (Fig. 1). Au contraire, l'approche par inversion contribue à plus d'efficacité et de pertinence puisqu'elle correspond, au moins conceptuellement, à la façon naturelle de poser un problème de conception (Fig. 2) :

les données connues du problème sont les sorties ou du moins les informations mathématiquement exploitables sur les sorties (spécifications du cahier des charges) et les inconnues sont les entrées (composants à déterminer et entrées de commande).

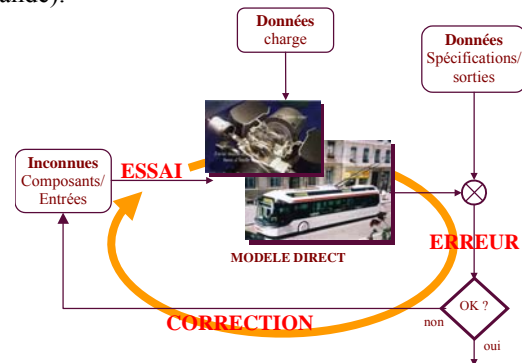


Fig. 1 : Principe du jeu essai/erreur/correction

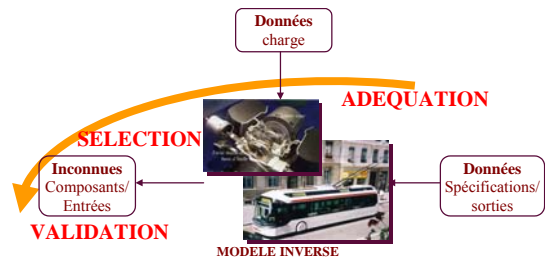


Fig. 2 : Principe de l'approche par inversion

### A1. Adéquation modèle de conception/problème de conception

. Objectif : bien poser un problème de conception avant toute simulation numérique.

. Verrous scientifiques : analyse structurale pour la commandabilité, l'inversion et le découplage entrées/sorties, synthèse d'architecture.

Sur cette problématique, des méthodes et outils performants ont été obtenus dans [hal-00202727]. Ces résultats ont été appliqués pour le dimensionnement de systèmes mécatroniques [hal-00375527] et électriques [hal-00358148]. En précisant la notion d'ordre d'essentialité dans le bond graph, des conditions et des procédures constructives ont été proposées pour vérifier l'existence d'une solution au problème d'inversion et de découplage [hal-00375777], [hal-00374603], [hal-00374609].

### A2. Aide à la rédaction du cahier des charges

. Objectif : guider la spécification des trajectoires en sortie.

. Verrous scientifiques : couplage de l'inversion avec l'optimisation dynamique, formulation hétérogène sur les spécifications en sortie, aide à la spécification, transfert logiciel et industriel.

Cette approche a permis de résoudre plusieurs problèmes d'optimisation en s'appuyant sur des formulations énergétiques [hal-00403245], [hal-00358876], [hal-00374349], [hal-00411224], [hal-00312905], [com-AM, 2007], [hal-00368302]. Ces résultats précurseurs ont été rendus possibles grâce au développement d'outils numériques [hal-00403236] qui permettent une mise en œuvre pratique

logicielle du couplage de l'inversion avec l'optimisation dynamique. Ils sont, pour l'instant, restreints au cas linéaire et se basent sur la détermination *a priori* des conditions initiales sur le co-état du problème d'optimisation [hal-00375999].

*A3. Etude de la robustesse des systèmes de dimension infinie*

. Objectif : analyse structurelle des systèmes en dimension infinie, notamment ceux régis par des équations aux dérivées partielles.

. Verrous scientifiques : approche algébrique et définition d'un anneau d'opérateur.

Des propriétés structurelles concernant la robustesse et la stabilité ont été démontrées dans [hal-00375577], [hal-00375549], [hal-00368367], [hal-00360162]. Ces propriétés ont été analysées principalement sur des problèmes de rejet de perturbation et de poursuite de modèle. L'étude de la stabilisation de systèmes neutres non formellement stables a conduit à un résultat original sur la nécessité d'utiliser un contrôle généralisé.

*B. Analyse comportementale pour la commande robuste*

La commande robuste est la branche de l'automatique qui étudie l'analyse et la commande des systèmes en tenant compte explicitement d'une information limitée sur les systèmes physiques. L'ensemble de ces travaux est basé sur une formalisation rigoureuse du cahier des charges et sur l'utilisation de l'optimisation convexe.

*B1. Analyse et commande des systèmes multivariables*

. Objectif : identification pour la commande.

. Verrous scientifiques : analyse entrée/sortie de systèmes incertains et optimisation convexe.

Les contributions ont concerné l'identification pour la commande. Des méthodes ont été proposées pour la mise au point de l'expérience d'identification d'un modèle d'un système à commander garantissant un niveau de performance donné pour le correcteur conçu à partir de ce modèle [hal-00347166]. Elles ont nécessité le développement de méthodes d'analyse de la robustesse vis-à-vis de classes d'incertitudes non standard.

*B2. Analyse des systèmes non linéaires incertains*

. Objectif : développer des méthodes de dimensionnement non linéaires.

. Verrous scientifiques : modélisation, analyse et exploitation des boucles non linéaires de rétroaction.

L'analyse du cahier des charges rempli par un système bouclé non linéaire est basée sur la norme incrémentale pondérée dans un cadre entrée/sortie et sur l'analyse par Integral Quadratic Constraints. Les travaux portent sur le développement d'outils d'analyse et de conception de réseaux synchronisés d'horloges et sur la modélisation et l'analyse de régulations métaboliques au sein de bactéries.

*B3. Commande des systèmes à paramètres variants dans le temps (LPV)*

. Objectif : contribuer à une approche mieux maîtrisée de la commande de systèmes non linéaires par gains variables.

. Verrous scientifiques : couplage entre la pratique ingénieur de la commande, la théorie de l'analyse non linéaire des systèmes Lipschitz continus et l'optimisation convexe.

Les méthodes de synthèse LPV existantes ont été complétées par l'utilisation de fonctions de Lyapunov dépendant de paramètres. Elles ont été programmées sous la forme de boîte à outils Matlab. Leur mise en œuvre a été étudiée pour la résolution de problèmes de l'industrie aéronautique avec

notamment comparaison aux commandes non linéaires classiques.

## POSITIONNEMENT ET COLLABORATIONS

Les travaux présentés dans cette fiche se positionnent essentiellement sur la priorité scientifique « Méthodes et outils génériques de modélisation » et les résultats pourront servir les priorités « Systèmes à fluides sous pression et robotique médicale », « Systèmes mécatroniques et embarqués » et « Gestion d'énergie ». Ils font appel aux compétences des équipes « Actionneurs et systèmes », « Commande » et « Modélisation ».

*A. Analyse structurelle et inversion pour la conception robuste*

Une collaboration historique existe avec la direction de la recherche de PSA Peugeot Citroën. Le déploiement méthodologique (spécification logicielle) s'est effectué au sein d'un projet ANR-RNTL [SIMPA2], [hal-00374640], [hal-00374609], [hal-00374616] et se poursuit au niveau européen dans le cadre du projet [OpenProd]. Dans le cadre d'un projet [LUTB], une collaboration renforcée a été mise en place avec le LAMCOS pour appliquer les résultats développés à la sécurité active du véhicule industriel (Volvo Trucks).

*B. Analyse comportementale pour la commande robuste*

Des travaux communs ont permis de renforcer les collaborations avec l'INRIA et l'IRCCyN. En outre, le développement de méthodes d'analyse de la robustesse vis-à-vis de classes d'incertitudes non standards a été effectué en collaboration avec l'Université de Delft. L'analyse des systèmes non linéaires incertains s'est faite en collaboration avec l'INRA (co-encadrement de la thèse d'Anne Goelzer) et le CEA (co-encadrement de la thèse d'Anton Kornienko). Enfin, les travaux touchant la synthèse LPV s'inscrivent dans une collaboration avec Astrium Satellites et Astrium Space Transportation dans le cadre d'un contrat pour l'European Spatial Agency, et avec Supélec dans le cadre d'un financement de thèse (co-encadrement de Safia de Hillerin) de la fondation EADS.

## PERSPECTIVES

Les principales perspectives de cette activité portent sur l'extension de l'analyse de propriétés structurelles à des classes de systèmes non linéaires, sur l'extension du couplage inversion/optimisation aux modèles non linéaires et aux modèles incertains, sur l'exploration des possibilités offertes par l'optimisation et l'approche entrée/sortie pour le dimensionnement, la commande et l'ingénierie inverse, et enfin, sur la problématique d'approximation de systèmes de dimension infinie, aussi bien d'un point de vue fréquentiel que temporel.



# 19. Apprentissage et assistance des gestes médico-chirurgicaux

R. Moreau, M.T. Pham, T. Redarce, X. Brun, W. Marquis-Favre

**Abstract**—L'activité robotique médicale du laboratoire Ampère s'intéresse aux gestes médico-chirurgicaux. Ces aspects sont abordés de deux façons, l'apprentissage du geste (médecins et patients) ainsi que l'aide aux gestes (médecins et patients). Dans le premier cas, nous nous intéressons au développement et la commande de simulateurs dédiés à l'apprentissage des gestes médicaux. Dans le second cas, nous étudions des systèmes d'assistance aux gestes afin de soulager le médecin des tâches pénibles et répétitives.

## INTRODUCTION

Traditionnellement, le geste médical est un geste appris empiriquement ce qui rend difficile le transfert du savoir-faire entre les médecins. À l'heure où les technologies récentes prennent une part de plus en plus importante dans les salles d'opérations, il s'agit 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. L'activité robotique médicale du laboratoire Ampère s'intéresse 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 pluri-disciplinaire repose sur des aspects de conception et de modélisation de systèmes mécatroniques, de commande de systèmes, et d'asservissement visuel.

## THEMATIQUES DE RECHERCHE

### A. Apprentissage du geste

#### 1) Simulateurs médicaux

Le laboratoire Ampère possède une activité sur les simulateurs médicaux dédiés à l'apprentissage du geste depuis 2001. Au sein de la communauté Robotique en France mais également au plan international, cette thématique est certainement la plus originale de l'activité. Le premier simulateur, développé au laboratoire en étroite collaboration avec les Hospices Civils de Lyon, est dédié à la formation des obstétriciens et des sages-femmes (fig. 1) [hal-00179487, hal-00368858].

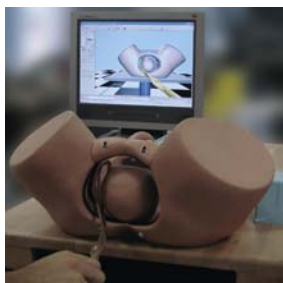


Fig. 1 : Simulateur d'accouchement BirthSIM

Ce simulateur d'accouchement permet aux obstétriciens de

se former sans risque à l'utilisation des forceps et aux sages-femmes d'apprendre les bons réflexes grâce à un système composé de trois parties distinctes : une partie anthropomorphe mécanique, une partie haptique électropneumatique et une interface de visualisation. L'utilisation combinée de ce dispositif et de forceps instrumentés munis des capteurs de position à six degrés de liberté permet de définir un protocole d'apprentissage répondant aux attentes des professionnels du milieu hospitalier. Un simulateur est actuellement installé à l'hôpital Lyon Sud et fait partie du cursus de formation des internes en obstétrique. Dans le même esprit, un simulateur, reposant sur les mêmes principes, a été développé en 2006 pour l'apprentissage de la pose d'implants contraceptifs sous-cutanés [hal-00339665].

Outre la conception et la commande de ces simulateurs, un autre aspect de ces travaux concerne l'analyse et l'évaluation des mouvements dans l'espace. À cet effet, des méthodes originales d'évaluation du geste ont été développées afin de quantifier objectivement la progression de la technique des utilisateurs formés sur le simulateur. Les résultats obtenus confirment et complètent les résultats issus de la littérature mais attestent aussi de l'intérêt d'un simulateur pour la formation des médecins [hal-00339685].

À la suite de ces résultats, nous avons engagé, depuis octobre 2008, de nouveaux travaux dont l'objectif est de développer des interfaces haptiques à six degrés de liberté pour l'apprentissage d'un geste médico-chirurgical. Contrairement aux systèmes haptiques existants, les interfaces envisagées seront réalisées avec des actionneurs pneumatiques afin d'offrir la meilleure compliance possible au système. L'objectif du projet est de proposer une nouvelle alternative aux méthodes d'apprentissage traditionnel des médecins sous la forme d'un système de guidage haptique maître-esclave le plus transparent possible. Nous envisageons de développer une interface haptique dédiée au médecin instructeur et une autre au médecin novice de sorte que le premier pourra à tout moment induire un mouvement et un effort particulier au second.

#### 2) Rééducation

Le but premier de ce projet est de mesurer l'efficacité d'un exosquelette de membres supérieurs, dédié aux patients en phase de rééducation motrice. À terme l'outil doit permettre de prendre en compte un éventail important de mouvements réalistes du bras même chez les sujets sévèrement handicapés. Le prototype disponible actuellement au laboratoire possède 4 degrés de liberté actifs : 3 liaisons pivot au niveau de l'épaule (abduction, rotation et flexion) et 1 liaison pivot au niveau du coude (flexion). Le second objectif de ce projet est le développement d'un système d'assistance, en associant par exemple exosquelette et électromyostimulation transcutanée rétrocontrôlée ou capteurs d'effort. Un certain nombre de verrous est abordé dans le cadre de ce travail. D'une part, il s'agit de s'intéresser à un problème de conception. À travers une structure mécanique externe, les concepteurs d'exosquelettes tentent la plupart du temps de reproduire les degrés de liberté correspondant à l'anatomie des membres devant être assistés. On aboutit à des structures mécaniques

pouvant être plus ou moins complexes. Par ailleurs lorsque des performances dynamiques relativement élevées sont recherchées, une des difficultés est de mettre en œuvre de petits actionneurs permettant à la fois d'atteindre les performances souhaitées et une intégration mécanique acceptable pour l'utilisateur. Du point de vue de la commande, le prototype proposé vise d'une part à assister un geste soit en complétant l'effort nécessaire à le réaliser (système actif), soit en exerçant un effort supplémentaire (système passif), et d'autre part à compenser le port (compensation de la gravité) de l'exosquelette afin d'éviter tout inconfort. Le dernier problème de ce type d'application est relatif à la génération des consignes aux actionneurs et à la sécurité. Les consignes peuvent résulter soit d'un choix de trajectoires types (par exemple programme de rééducation) et donc être imposée, soit de la détection de la volonté de mouvement chez l'utilisateur. Enfin, la sécurité est un problème complexe puisqu'il est nécessaire de déterminer quand le mouvement est réellement désiré, mais aussi si l'action de l'exosquelette risque d'engendrer un traumatisme à l'utilisateur. Le prototype que nous développons dans le cadre de ce projet doit répondre à terme à l'ensemble de ces problématiques (fig. 2) [hal-00374666].



Fig. 2 : Exosquelette de membre supérieur

#### B. Assistance au geste médical

##### 3) Coloscopie

Depuis quelques années, nous nous sommes intéressés à l'assistance aux gestes en coloscopie, et avons développé des stratégies de guidage de coloscopes afin de faciliter la tâche du bécquillage (orientation de l'élément distal par des molettes), et laisser le médecin se concentrer uniquement sur la tâche d'insertion de l'outil. Un élément distal souple en technologie pneumatique a ainsi été développé avec ses lois de commande pour répondre à cet objectif. Cette étude a permis de développer un asservissement local de l'élément distal en utilisant des capteurs de distance optiques (coopération avec Roberval – UTC) [hal-00202979]. Nous avons aussi modélisé la tête d'un coloscope munie d'une chaîne d'actionnement électrique. Actuellement, nous travaillons sur le pilotage de l'élément distal de ce prototype en utilisant les images issues de la vidéo d'une intervention.

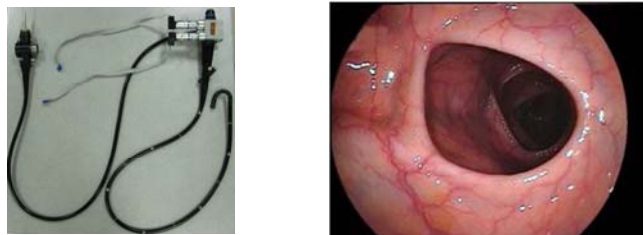


Fig. 3 : Images d'un coloscope et d'un côlon

Enfin, nous avons depuis peu initié des projets avec le laboratoire Roberval de l'UTC, afin d'utiliser la lumière

structurée pour aider le médecin à mieux percevoir la troisième dimension dans les images 2D.

##### 4) Laparoscopie

Nous avons commencé à nous intéresser à cette problématique à partir de l'année 1999, à la demande du docteur Philippe Mouret, inventeur de cette technique opératoire. L'objectif initial était d'étudier une architecture de robot porte endoscope plus ergonomique que celle du robot AESOP utilisé à cette époque. Pour remplacer la commande vocale existante sur ce type de robot, nous travaillons actuellement sur deux pistes permettant de libérer le chirurgien de cette tâche. La première consiste à effectuer un asservissement visuel sur la position des outils du chirurgien. L'idée est d'exploiter l'image issue de l'endoscope pour élaborer la commande du robot de manière à garder les instruments au centre de l'écran de contrôle du chirurgien. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec le LIVIA, École de Technologie Supérieure Montréal Canada. La seconde stratégie repose sur la génération de consignes des axes du robot à partir des mouvements du visage du chirurgien (fig. 4), des mouvements des lèvres et de la langue, l'objectif est d'en déduire les consignes de déplacement à envoyer au robot [hal-00402194]. Ce travail s'effectue au sein d'une coopération avec le professeur Olivier Jegaden des Hospices Civils de Lyon et l'Université de Sede Manizales Colombie.



Fig. 4 : Asservissement visuel

Enfin, un dernier aspect de ceux travaux concernent l'analyse et le développement d'une structure de robot souple (type serpent ou trompe d'éléphant), afin de pouvoir explorer l'intérieur de l'abdomen à partir d'un trocart [hal-00373783].

#### B. Collaborations nationales et internationales :

- Hospices Civils de Lyon
- INSERM (Unité 864 - Espace & Action – Lyon)
- LIRIS (UCBL - Lyon 1)
- Laboratoire Roberval UTC (Compiègne)
- Laboratoire AMMI de l'University of Alberta (Canada)
- Center of Machine Perception de Czech Technical University de Prague (République Tchèque)
- Université de Sede Manizales (Colombie)
- Laboratoire LIVIA de l'ETS de Montréal (Canada)



## 20. Sûreté de fonctionnement des systèmes : diagnostic, pronostic et commande tolérante aux fautes

E. Boutleux, G. Clerc, E. Niel

**Résumé** — Notre approche de la sûreté de fonctionnement est basée sur 2 axes. Le premier axe est l'identification de défauts dans les systèmes complexes ; le second est le pronostic des futurs états possibles à partir de la connaissance de leur historique et la synthèse de commandes tolérantes aux fautes ainsi détectées. Nous avons développé des méthodes que nous avons appliquées aux entraînements électriques

### INTRODUCTION

La prédiction de défauts repose sur la recherche des signatures et la mise en place de méthodes de supervision permettant d'identifier les défaillances, de suivre le vieillissement des appareillages et d'anticiper les défauts. La commande tolérante aux fautes relève de la capacité d'un système à fonctionner malgré les dysfonctionnements détectés et identifiés. C'est une problématique de commande qui s'alimente des informations issues du diagnostic des défauts et qui s'appuie sur la flexibilité résiduelle du système commandé. Les liens entre les fonctions de diagnostic, de supervision et de commande réactive sont naturels, pour lancer une reconfiguration de la commande, il est nécessaire d'avoir reconnu la première cause de défaillance. De plus la reconfiguration ne peut être efficace que si le système est physiquement capable d'en assumer l'impact. Ce bouclage est maintenant possible du fait de la mixité des compétences Ampère relevant du Génie Electrique et Automatique.

### POSITIONNEMENT INTERNATIONAL

Les méthodes de surveillance ont fait l'objet de nombreux développements internationaux. Nous avons plus spécifiquement travaillé sur les méthodes de reconnaissance de forme (RdF) et sur les méthodes basées sur les modèles.

L'investissement de la communauté internationale DES (Discrete Event System) et DCDS (Dependable Control of Discrete System) initié par les travaux fondamentaux de Wonham [1] se situe sur des problématiques d'architecture de contrôle et de diagnostic sous observation partielle. Toutefois, rares sont les travaux concernant l'implantation de commande synthétisées sur système réel et des capacités de reconfiguration après faute.

### VERROUS SCIENTIFIQUES

Les verrous scientifiques du diagnostic concernent la mise en place de nouvelles méthodes de supervision générant un faible taux de fausses alarmes, prenant compte l'apparition de nouveaux modes de fonctionnement et dont on peut évaluer la fiabilité.

Les verrous scientifiques d'une commande sûre tolérante aux fautes sont l'absence de synergie entre les techniques de synthèse de contrôleurs discrets (SdC) et de vérification formelle, la maîtrise de l'explosion combinatoire en taille des systèmes à contrôler, et l'implantation efficace des contrôleurs synthétisés sur des systèmes électroniques programmables. De même, l'usage de techniques formelles pour la reconfiguration reste souvent difficile à appliquer du fait de spécifications incorrectes ou incomplètes.

### APPORT AMPERE

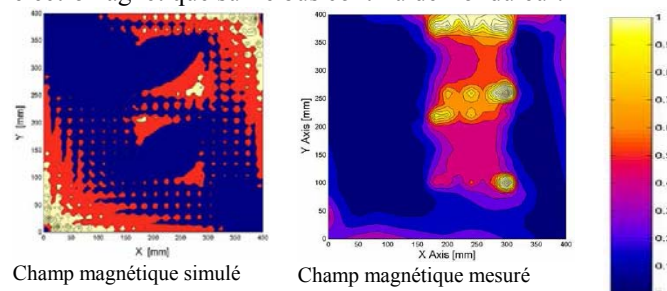
Autour des différents moyens et techniques de sûreté de fonctionnement, les apports majeurs d'Ampère se situent en diagnostic et en commande réactive.

#### A. Diagnostic et supervision des défauts

Le diagnostic des défauts repose sur la détermination de grandeurs caractéristiques des défauts (signature) et de méthodes de supervision exploitant ces signatures.

##### 1) Les signatures

Nous avons développé des modèles permettant de suivre l'évolution des différentes pannes d'un système d'entraînement électrique à partir de mesure électromagnétique sur le bus continu de l'onduleur.



Fi. 1 : Structure à trous alimentée sous 1A à 1MHz, avec charge de 50  $\Omega$  Pour approfondir sur cette approche, nous avons mis en place une coopération Franco-Tunisienne avec un laboratoire de l'école polytechnique de Tunis dans le cadre de l'appel d'offre Hubert-Curien (cotutelles).

Par ailleurs, nous avons aussi développé des signatures fréquentielles et statistiques des composantes des courants statoriques permettant de discriminer les défauts stators et rotors d'une machine asynchrone.

##### 2) Classification par Méthodes de reconnaissance de forme et distances

Notre approche est basée sur l'utilisation des méthodes de reconnaissance des formes pour effectuer une classification des défauts.

Des défauts ont été créés au rotor et au stator d'une machine asynchrone, alimentée soit à partir du réseau, soit par le biais d'un onduleur de tension. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, est extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine et automatiquement optimisé en vue de la classification. Les règles de décisions utilisées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnements connus avec ou sans défaut. La procédure de décision, basée sur la règle des k - plus proches voisins, associée à une fonction d'appartenance, permet de classer les défauts avérés et de quantifier la pertinence de la classification.

Par la suite, le suivi d'évolution de ces modes de fonctionnement vers de nouvelles zones de l'espace est réalisé par une approche de type Kalman.

Cette activité a fait l'objet d'un projet « Health monitoring », avec HISPANO-SUIZA dans le cadre de SPEC (Safran Power Electronic Center) et d'une collaboration avec les laboratoires Laplace et Green.

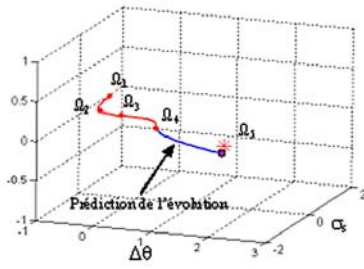


Fig.2. Interpolation et prédiction par approche de Kalman

### 3) Classification par Méthodes de reconnaissance de forme et représentation temps fréquence

Afin d'améliorer le processus de classification, deux approches ont été développées :

L'association de Représentations Temps-Fréquence (RTF) à un critère de décision basé sur la distance de Mahalanobis.

$$RTF_x^\phi(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi, \tau) A_x(\xi, \tau) e^{j2\pi(\tau\xi - f\tau)} d\xi d\tau$$

La RTF sert à l'extraction des points pertinents qui séparent au maximum, selon le critère de Fisher, deux états : l'un sain et l'autre en défaut. Toutefois le choix des points est expertisé, ce qui rend cette méthode semi automatique.

L'association RTF - HMM (Modèle de Markov Caché) permet l'automatisation complète de la procédure de diagnostic des défauts depuis l'acquisition et le traitement des données jusqu'à la prise de décision.

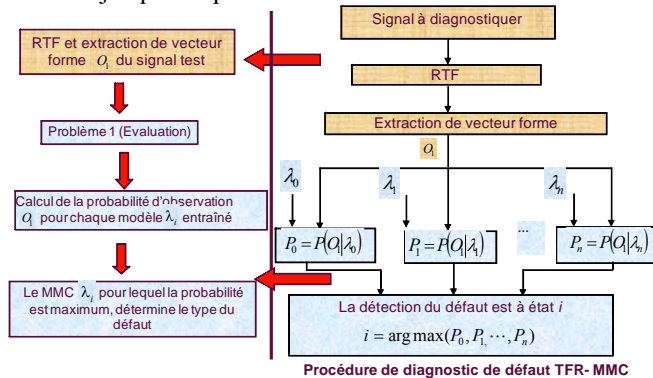


Fig.3. Classification par RTF et Chaîne de Markov Cachée

Cette activité a lieu dans le cadre de l'accueil durant deux ans d'un chercheur de l'Université de Constantine.

### B. Commande tolérante aux fautes

La conception de lois de commandes discrètes sûres (tolérantes aux fautes) pour les systèmes industriels porte sur la conception d'architectures réactives dont la validation nécessite l'utilisation de techniques formelles de vérification et de SdC.

#### 1. Mise en œuvre de superviseurs synthétisés

Cette activité a pour objectif d'appliquer la synthèse de contrôleurs discrets à des systèmes de taille réelle. Deux directions ont été développées dernièrement :

Cette activité a pour objectif d'appliquer la SdC à des systèmes de taille réelle. Deux directions ont été développées dernièrement :

D'abord, la *détermination du résultat de synthèse* constitue une étape indispensable dans la transformation d'un superviseur synthétisé en un contrôleur déterministe et donc autonome. Les techniques symboliques permettent d'aborder

des systèmes de complexité réaliste ; en revanche, le superviseur ainsi obtenu n'est pas structuellement compatible avec le système contrôlé, au sens de l'assemblage de modules communicants. L'approche proposée permet la mise en œuvre de superviseurs et résout l'incompatibilité structurelle citée précédemment. Le contexte d'application visé est celui des systèmes réactifs synchrones, tels que les contrôleurs discrets dans les systèmes embarqués.

Ensuite, notre but est le *passage à l'échelle* de la SdC, afin de l'appliquer à des systèmes de taille importante. Pour cela, nous étudions des techniques et méthodes compositionnelles, permettant de maîtriser la complexité du système à contrôler.

### 2. Gestion des modes de fonctionnement

Le changement de mode est un des problèmes délicats que nous étudions et pour lesquels nous proposons des modèles de mode et la validation formelle des commutations de mode. Le passage d'un mode de fonctionnement initial à un mode final n'est certainement pas direct, cela impose sur le terrain des ajustements (modes transitoires) de composants et de leur commande. Nos travaux les plus récents portent sur une approche multi-modèle pour les SED, l'alternance de mode est assurée par un mécanisme de suivi de l'évolution du système commandé qui permet de déterminer les états à partir desquels un « raccordement » fonctionnel est permis. La théorie de contrôle par supervision est une approche que nous étendons pour détecter et traiter les incompatibilités entre spécifications de mode.

### 3. Assistance à la configuration

Nous avons présenté des outils d'assistance à la prise de décision pour la configuration des systèmes distribués en optimisant les consommations d'énergie et l'activation des actionneurs. La réactivité aux fautes conduit également à concevoir des architectures robustes. A ce titre, nous développons des algorithmes visant à fonctionner sous énergie contrôlée ou charge équilibrée.

Dans le premier cas (application aux réseaux de capteurs sans fil), nous nous intéressons aux fonctionnalités par la recherche de chemins optimaux permettant d'augmenter la durée de vie du réseau tout en garantissant un équilibrage de charge entre nœuds.

Concernant les charges équilibrées, nos travaux actuels visent l'assistance aux opérateurs de conduite d'un terminal pétrolier. A partir d'un modèle de connexion (alignement réservoir-tanker représenté par un graphe), nous avons défini des paramètres de capacité opératoire, et développé des algorithmes pour optimiser les opérations d'alignement vis-à-vis des possibles aléas et indisponibilités, tel que la surcharge, les défaillances de composants, des interventions de maintenance, ou la rupture d'un pipeline.

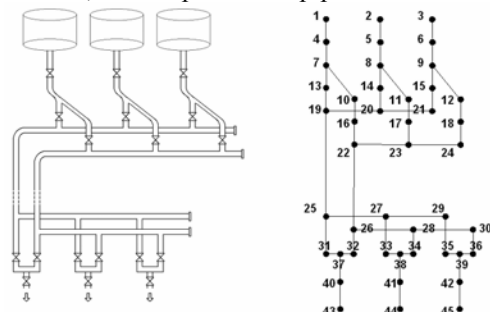


Fig.4. terminal marin de Guaraguao multicharge

---

# **Annexes**

---

***Plan de formation de l'Unité***

***L'hygiène et la sécurité au Laboratoire Ampère***

***Production scientifique***

## Plan de formation de l'Unité

Cette annexe fait le point sur les formations suivies par les personnels de l'unité. En tant qu'Unité Mixte de Recherche, toutes les formations du laboratoire s'inscrivent dans le cadre d'un plan de formation de l'unité (PFU) qui est rédigé chaque année. Nous rappellerons la méthodologie utilisée pour la rédaction de ce document puis nous ferons un bilan des formations suivies durant les années 2007 à 2009. Pour chaque année, on tentera de comprendre la différence entre les formations inscrites dans le PFU et celles qui ont réellement été effectuées.

### I. Méthodologie d'élaboration du plan de formation 2007- 2010

Afin de mieux gérer les besoins en formation de ses personnels et conformément aux souhaits du CNRS, un plan de formation pour le laboratoire doit être établi chaque année. Pour assumer cette charge un correspondant de formation a été nommé par le Conseil de Laboratoire. L'une de ses missions est d'identifier et recenser les besoins en formation des personnels à partir des objectifs scientifiques du laboratoire et des plans de carrière des chercheurs ou techniciens. Une autre de ses missions est de mesurer la qualité des formations et le retour sur l'unité ou la personne.

L'analyse des besoins est réalisée par un entretien avec le directeur du laboratoire et par un questionnaire sous forme de mail auprès des responsables d'équipe et de tout le personnel du laboratoire. Un entretien individuel est possible pour les agents qui le désirent.

Tous ces besoins sont classés et détaillés dans le PFU en les replaçant dans le contexte de l'activité ou de l'environnement de travail des agents. A la fin du document un tableau regroupe de manière synthétique ces besoins et un bilan des formations effectuées l'année précédente est dressé en essayant d'estimer leur efficacité.

### II. la formation dans le laboratoire

Dans le cadre de son plan de formation au niveau national, le CNRS a mis en place des actions de formation. Elles peuvent être organisées soit au niveau national soit au niveau régional. Certaines formations permettent de faire le lien entre la délégation et le personnel afin de leur apporter une meilleure compréhension dans leur mission. Parmi elles on peut citer les formations aux nouveaux entrants, aux correspondants formation, gestionnaires de laboratoire etc ... Des écoles thématiques sont organisées pour apporter des formations sur des points spécifiques. Initialement, les autres tutelles offraient moins de possibilité de formation à leur personnel. Certains établissements maintenant ont fait un gros effort dans ce sens. Enfin certaines formations sont financées directement par le laboratoire ou par le département notamment pour les formations collectives qui regroupent des stagiaires d'origine différente.

D'un point de vue général, le laboratoire assume régulièrement la prise en charge de certaines formations qui ne peuvent être financées par les tutelles, notamment pour les enseignants-chercheurs.

### III. Les formations au cours de l'année 2006 - 2007

Le total des formations pour l'année 2006-2007 est de 58 jours hommes et de 20h de langues.

Nature de la formation	Nombre de personnes	Durée (jours-hommes)
Electromagnétisme pour les biologistes	3	
Biologie pour les électriciens	3	
Habilitation électrique	Environ 15	20
Management d'équipe	1	
Démarche qualité dans la recherche	2	
Formation aux premiers secours	4	4
Anglais (perfectionnement)	2	20h
Autocad (perfectionnement)	2	4
Soudure MIG et TIG	2	



Fraisage et tournage mécanique	1	
Perfectionnement en logiciels bureautiques	2	12
SPIP	1	
Gestion du temps	1	
Micro systèmes et microbiologie	3	
Préparation à la validation des acquis	1	
Linux	1	12
Formation jury		3
labview		4
Journées EEA production d'énergie électrique		2

#### *Besoins en formation pour l'année 2006-2007*

Les formations Electromagnétisme pour les biologistes et biologie pour les électriciens qui avait été demandées lors de la fusion du laboratoire ont été faites de façon interne par chacune des deux équipes au cours de discussions et réunions de travail.

La formation management d'équipe qui avait été formulée n'a pas été recherchée par manque de temps.

Les formations aux premiers secours sont organisées par les tutelles locales régulièrement sur chaque site.

En informatique la formation demandée sur Linux a été effectuée ainsi qu'une autre concernant windows server.

Par contre les formations en mécanique qui étaient demandées n'ont pas pu être montées.

La demande concernant les langages bureautiques a été transformée par une formation Xlab, le besoin étant apparu en cours d'année.

Certaines formations non prévues ont pu être suivies :

Une formation aux jury de concours CNRS dans le cadre d'une participation à un jury d'admission.

Une formation labview organisée par le CNRS : Quelques places étant libre , 2 personnes du laboratoire ont pu la suivre.

#### **IV. Les formations au cours de l'année 2007 - 2008**

Le total des formations est de 70 jours hommes et de 24h de langues.

<b>Nature de la formation</b>	<b>Nombre de personnes</b>	<b>Durée (jours-hommes)</b>
Démarche qualité dans la recherche	3	12
Gestion de projets, de contrats	2	
Management d'équipe	1	
Bio-informatique,	4	
Formation au logiciel R pour analyser des données issues de bio puces.	1	
Habilitation autoclave	1	
Les nematodes et les protozoaires dans l'environnement sol.	1	
Techniques de dépollution des sols par bioremediation et électrocinétique	1	
Conception et organisation de logiciels scientifiques	2	
Calcul Parallèle	1	6
Secouriste du travail	2	
Anglais (perfectionnement)	4	24h

Brésilien (débutant)	1	
LDAP et Sécurité informatique	1	5
Législation dans le domaine de l'environnement	1	
Powerpoint, Photoshop	1	2
Excel (perfectionnement)	1	
Soudure MIG et TIG	2	
Fraisage et tournage mécanique	1	
Gestion du temps	1	2
Préparation à la validation des acquis	1	2
Préparation aux concours internes		
Nanoparticules dans les cellules vivantes	0	8
labview	0	35

#### *Besoins en formation pour l'année 2007-2008*

La formation sur la qualité en recherche qui avait déjà été mise en avant l'année précédente a pu être suivie par deux personnes du laboratoire grâce à une ANG-D du CNRS. Cette formation de deux fois trois jours a été jugée très enrichissante. Actuellement une démarche qualité a été entreprise dans une équipe et doit être étendue par la suite au reste du laboratoire.

Les formations de gestion de projet et management d'équipe dont le besoin a été exprimé une nouvelle fois n'ont toujours pas été suivies toujours par manque de temps des intéressés pendant l'année.

Les formations autour de l'environnement sont très spécialisées et sont difficiles à trouver par contre une formation proposée par le CNRS sur les nanoparticules a pu être suivie par 2 personnes de l'équipe microsystème.

La formation sur le calcul parallèle qui était demandée a pu être suivie par deux chercheurs et plusieurs formations en informatique ont été suivies par l'ingénieur système du laboratoire.

Enfin comme l'année précédente des places disponibles dans une formation labview organisée par le CNRS ont permis à plusieurs personnes du laboratoire de se former.

#### **V. Les formations au cours de l'année 2008 - 2009**

Le total des formations est actuellement de 17 jours hommes et de 24h de langues.

<b>Nature de la formation</b>	<b>Nombre de personnes</b>	<b>Durée (jours-hommes)</b>
Habilitation autoclave	<b>2</b>	
Habilitation électrique	<b>10</b>	
Secouriste du travail	<b>2</b>	0,5
ACMO	<b>1</b>	
Anglais (perfectionnement)	<b>3</b>	24h
Brésilien (perfectionnement)	<b>1</b>	
Conception et organisation de logiciels scientifiques Calcul scientifique, Développement et valorisation de logiciels libres	<b>3</b>	
Outils pour le travail collaboratif	<b>1</b>	
Bio-informatique	<b>6</b>	
Microfluidique, bio électromagnétisme	<b>1</b>	2
Culture cellulaire	<b>1</b>	

Bonnes pratiques de laboratoire	1	
MATLAB	1	
Formation sur logiciel Flux et Portunus	1	
Mesures infrarouges et interprétation des résultats	1	
Excel (perfectionnement)	1	4,5
Microsoft Project (débutant)	1	
Soudure MIG et TIG	2	
Systèmes et réseaux	1	5
Développement d'applications WEB	1	
Formation au management d'équipe	1	
Enjeux sociétaux dans l'enseignement et la recherche		2
Formation atelier du savoir nano technologies		3

### *Besoins en formation pour l'année 2008- 2009*

A ce jour, l'habilitation autoclave n'a toujours pas été programmée.

L'habilitation électrique a été planifiée en juin mais a été annulée par le manque de participants pouvant se libérer à cette date. Elle doit être reprogrammée au mois d'octobre ou Novembre de cette année.

Une formation sur la valorisation de logiciels libres a bien été organisée cette année par le CNRS mais n'a pas pu être suivie pour indisponibilité aux dates proposées.

La demande de formation en bio-informatique qui est récurrente s'avère être trop imprécise. En effet sous ce même nom plusieurs demandes dans le laboratoire correspondent en fait à des choses très différentes. Un budget a été alloué cette année à l'une de ces demandes mais uniquement sur le territoire Français, or les seules formations correspondant se trouvaient à l'étranger.

La formation en microfluidique a été financée par le laboratoire et a été jugée très enrichissante.

Plusieurs formations en informatique ont été suivies par l'ingénieur système du laboratoire.

Cette année, un chercheur en sciences et société a intégré le laboratoire et certaines formations non prévues initialement ont été nécessaires.

## **VI. Bilan des formations**

D'une manière générale, malgré plusieurs relances, le nombre de réponses est assez faible. Cela peut provenir de plusieurs raisons. Par culture, les chercheurs ou enseignants du laboratoire sont peu habitués à chercher et suivre des formations, l'essentiel des nouvelles connaissances se faisant par des congrès ou publication.

D'un point de vue général, les formations standards qui apparaissaient avant sous la forme d'un catalogue sont assez souvent réalisées car les besoins sont bien identifiés et comme elles sont nombreuses, les stages sont multiples. Par contre les formations plus pointues sont plus difficiles à caractériser et à construire car elles sont rarement proposées « clé en main ».

On peut constater que souvent un délai de deux ans est nécessaire pour que la formation dont le besoin a été exprimé soit réellement effectuée

On peut noter qu'une bonne partie des formations effectivement suivies étaient recensées dans le PFU. Pour les autres, soit une demande assez générale avait été formulée et nous avons saisi l'occasion de formation plus ciblée qui ont été proposées. C'est le cas de formation en programmation (calcul parallèle) ou en gestion de système informatique (infrastructure réseau, XML, ...) Enfin certaines sont difficiles à anticiper.

- Lors de l'arrivée de nouveaux entrants en cours d'année ou peuvent être nécessaires des mises à niveaux ou des adaptations au poste de travail.
- Lors de l'acquisition d'un nouvel appareil ou logiciel ou même la création d'un nouvel axe de recherche.
- Des opportunités de formations proposées par nos tutelles qui correspondent à un besoin réel mais qui n'a pas été formulé car il n'était pas prioritaire.

Par contre beaucoup de formations, dont le besoin s'est manifesté lors de la rédaction du PFU, ne sont pas réalisés dans l'année qui suit. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons.

- L'époque de la rédaction du plan de formation permet de motiver le laboratoire sur l'importance de la formation mais cette motivation retombe doucement au cours de l'année.
- Le manque de précisions dans la description du besoin rend difficile la recherche de la formation adéquate.
- Souvent les formations sont proposées durant l'année mais les demandeurs ne sont pas disponibles au moment où la formation est proposée en particulier à cause des contraintes d'enseignement.
- Dans certains cas, il est difficile de trouver des formations convenant à un domaine très pointu. De plus ces formations peuvent exister dans des pays étrangers mais le financement est alors beaucoup plus difficile à obtenir.
- Dans la majorité des cas, il est demandé à l'agent de rechercher la formation et d'en fournir les devis. Il n'est pas certain que tous l'aient compris. Souvent ils ne vont pas au delà de l'expression du besoin et attendent que la formation leur soit proposée.
- Rappelons enfin que le laboratoire possède 4 tutelles et que toutes n'ont pas la même politique de formation. Lors de formation collectives comme les habilitations diverses on retrouve plusieurs tutelles concernées par les demandeurs et il est difficile d'obtenir d'une tutelle le financement de la formation pour toutes les origines.

## **VII. Axes futurs**

Dans les années à venir un effort particulier va être fait sur tout ce qui concerne la sécurité. Tout d'abord par l'organisation de formations pour les habilitations autoclave et chimique qui sont primordiales. L'effort sur l'habilitation électrique devra continuer pour la formation des nouvelles recrues et pour le recyclage des personnels habilités.

Dans le secteur de la bio informatique, il devra y avoir un travail pour clarifier les besoins et les formations existantes.

Dans le cadre de la démarche qualité qui se fait dans le laboratoire, un membre de l'équipe bio devrait suivre une formation sur les « bonnes pratiques de laboratoire »

Comme l'informatique ne cesse d'évoluer, que ce soit au niveau système, sécurité, ou langage, nous continuerons à faire suivre des formations informatiques à l'ingénieur système du laboratoire.

Un effort sera également fait pour organiser des formations dont les besoins apparaissent de manière récurrente depuis plusieurs années comme la pratique de la soudure MIG et TIG.

# **L'hygiène et la sécurité au laboratoire Ampère**

ACMO: M. Lazar

Correspondants ACMO sur les sites : M. Lacroix, S. Sesmat, Y. Zitouni

En regardant l'évolution de notre laboratoire nous observons ces dernières années que ses thématiques de recherche se développent bien au delà du domaine du génie électrique. Si dans le passé nous avons été confrontés à la présence principale des risques électriques, notre personnel se retrouve dans un environnement susceptible de l'exposer à d'autres types de risques, notamment chimiques et biologiques.

Pour l'identification de ces risques, un travail permanent de sensibilisation du personnel est conduit par l'équipe du service d'hygiène et sécurité, répartie sur les 3 sites du laboratoire: ECL, INSA et UCB. Une fois l'évaluation des risques faite avec l'ensemble des utilisateurs, ceux-ci sont classés dans le document unique et traités en vue de leur maîtrise et de leur prévention.

## **I. Structure de l'Hygiène et de la Sécurité au laboratoire AMPERE**

Le service d'hygiène et sécurité est conçu afin de répondre aux exigences imposées par un laboratoire qui fonctionne sur plusieurs sites. La proximité et l'intervention immédiate en cas de besoin sont ainsi favorisées. Chaque site (ECL, INSA et UCBL) a son agent ACMO qui travaille et essaie de résoudre les éventuels problèmes en contact direct avec le responsable de site. Ils exercent notamment un travail de sensibilisation et d'information conduisant à l'analyse des risques et la mise en place des règles de sécurité. Deux ACMOs sont présents sur le site INSA, Ampère étant présent sur deux bâtiments différents (bât. L. de Vinci et bât. St Exupéry). Un agent ACMO pour l'ensemble du laboratoire est chargé de coordonner et diriger cette activité avec le directeur de l'unité.

Au niveau de chaque site, les ACMOs s'appuient également sur les chargés hygiène et sécurité de chaque établissement d'accueil ainsi que sur l'ingénieur régional de prévention et de sécurité du CNRS. Un service d'infirmerie avec un médecin de travail existe sur chaque site ainsi qu'à la délégation régionale CNRS.

Le laboratoire ne dispose pas d'un comité hygiène et sécurité, en revanche l'ACMO coordinateur est invité au Conseil du laboratoire qui se réunit une fois par mois.

## **II. Gestion des risques**

### **II-1. Inventaire du parc d'installations**

Chaque installation expérimentale présente un risque plus ou moins élevé pour les différentes personnes qui l'utilisent (enseignants-chercheurs, ITA-IATOS, étudiants doctorants ou en stage de master). Son niveau de risque dépend essentiellement des mises en sécurité qui ont été réalisées. Quand ces dernières s'avèrent coûteuses et difficiles à mettre en œuvre, une description détaillée doit être affichée et présentée à tout utilisateur potentiel. Afin d'éviter tout risque, le fonctionnement et les règles de prévention sont détaillés avec des formations spécifiques pour les utilisateurs.

Dans cet esprit un inventaire des installations se réalise périodiquement sur les trois sites. Le matériel affecté est recensé ainsi que le ou les responsables de chaque installation.

La périodicité de l'inventaire est nécessaire puisqu'il y a une évolution permanente des parcs d'installations. Il est nécessaire ainsi qu'une mise à jour soit réalisée régulièrement. De plus toute création de nouvelle installation se fait d'après les règles décrites ci-dessous.

### **II-2. Dispositions mises en œuvre pour la prévention des risques**

Tout responsable d'une installation est chargé de veiller sur le bon fonctionnement de celle-ci et de la prévention des risques éventuels. Pour ce faire, il s'appuie sur les ACMO ainsi que sur les responsables des sites et des équipes.

Pour chaque installation une fiche signalétique est mise en place. Cette fiche est rédigée et actualisée par les responsables de l'installation en s'appuyant sur l'un des ACMO. Elle résume les différents risques: électriques, chimiques, mécaniques, rayonnement ou autres, spécifiques à chaque installation. Les consignes d'utilisation sont mentionnées ainsi que celles de prévention et de protection. Les personnes à contacter en cas d'urgence sur chaque site sont signalées ainsi que les consignes pour appeler les pompiers en cas de besoin.

Une fois répertoriés les risques que l'installation comporte, ces données sont insérées dans le Document Unique d'Hygiène et Sécurité du laboratoire. Ce document de synthèse est actualisé au fur



et à mesure de la réception des différentes données. C'est un outil de travail qui permet par une mise à jour régulière d'évaluer et mesurer les risques en les classant par degré de gravité.

## ***II-2 Actions spécifiques***

Afin d'assurer un travail dans des bonnes conditions de sécurité, un effort substantiel est également porté sur la formation du personnel et sur sa sensibilisation aux risques spécifiques.

### **Risques électriques**

Il a été décidé que tous les personnels permanents disposent d'une habilitation électrique. Durant ce quadriennal, plusieurs sessions de formation ont été réalisées sur les différents sites. Ces formations, s'étendant sur plusieurs journées avec des cours théoriques et pratiques, ont été assurées par la société CAMIRA.

Nous veillons à pérenniser ces formations, à les rendre obligatoires pour les nouveaux entrants et à réaliser des sessions de recyclage pour les personnels habilités.

### **Risques chimiques**

Les achats et la gestion de produits chimiques et de gaz sont groupés par site. Les achats des produits chimiques se font par l'intermédiaire d'un service spécifique de l'établissement ; les achats de gaz se font avec une société avec laquelle les établissements ont établi un contrat cadre.

Le personnel concerné est formé sur l'utilisation des produits chimiques, leur stockage, et l'élimination des déchets. Une collecte des déchets chimiques est mise en place par les établissements avec une périodicité de 2 mois. Des bacs avec un étiquetage spécifique, avec des couleurs différentes pour les acides, bases ou solvants, ont été définis afin d'éviter le mélange des produits chimiques (ce qui représente la cause la plus fréquente des accidents).

Une restriction pour l'accès à ces locaux spécifiques, où des travaux de chimie sont réalisés, a également été mise en place afin qu'ils ne soient utilisés que par le personnel formé.

### **Risques biologiques**

Lors de la création du Laboratoire Ampère en janvier 2007, une nouvelle équipe « Génomique microbienne environnementale » a été intégrée sur le site ECL. Dans ce contexte, une sensibilisation aux risques biologiques a été faite auprès des membres de l'équipe : signalisation particulière, exposés pour les expérimentateurs concernant les risques spécifiques. Un livret de consignes pour les nouveaux entrants vient d'être réalisé.

Une collecte des déchets biologiques a été mise en place en plus de celle des déchets chimiques organisée par l'Ecole Centrale.

## ***Production scientifique***

La production scientifique complète du laboratoire a été mise sur sur le site d'archives ouvertes du CCSD/CNRS (HAL). Elle pourra être trouvée à l'adresse suivante :

<http://www.ampere-lab.fr/spip.php?rubrique4>