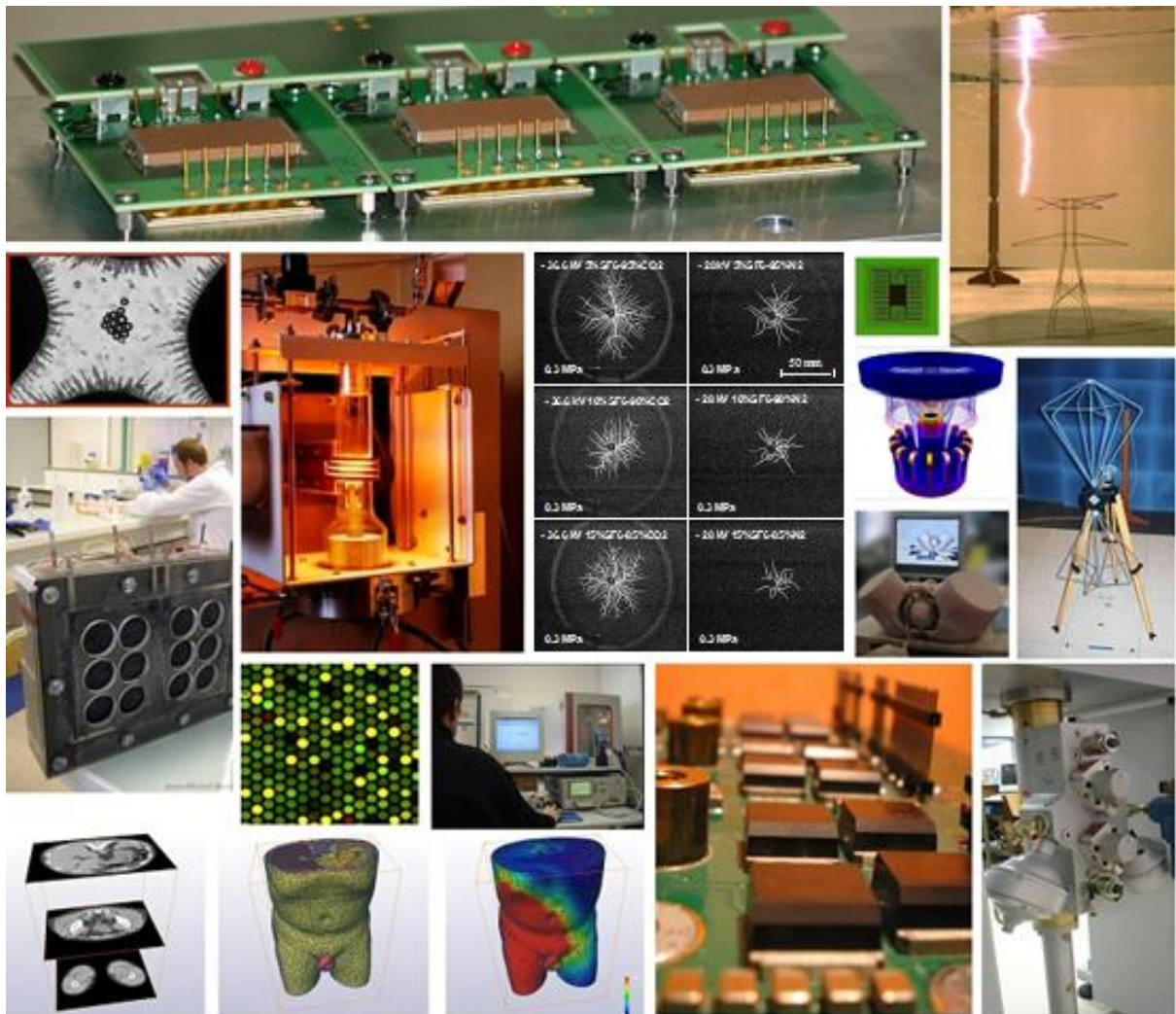


# Laboratoire Ampère

UMR CNRS 5005

Génie électrique, Electromagnétisme, Automatique,  
Microbiologie environnementale et Applications

## Projet scientifique 2011-2014





# Table des matières

---

Table des matières .....	1
Auto-analyse et projet du Laboratoire Ampère.....	3
Auto-analyse du laboratoire .....	4
Projet et objectifs scientifiques du laboratoire .....	8
Structuration en Départements et en groupes de recherche.....	12
Moyens mis en œuvre pour atteindre les objectifs affichés.....	17
Département "Méthodes pour l'ingénierie des systèmes" .....	21
Département "Méthodes pour l'ingénierie des systèmes" .....	22
Groupe " Modélisation multi-échelle pour la conception " .....	30
Groupe "Automatique, commande et mécatronique" .....	38
Groupe "Fiabilité, diagnostic et supervision" .....	44
Département "Energie électrique" .....	49
Département "Énergie électrique" .....	50
Groupe "Électronique de Puissance et Intégration" .....	53
Groupe "Matériaux pour le Génie électrique" .....	61
Département "Bioingénierie" .....	69
Département "Bioingénierie".....	70
Groupe "Bioélectromagnétisme et Microsystèmes" .....	73
Groupe "Génomique Microbienne Environnementale" .....	78



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

---

***Auto-analyse du laboratoire***

***Projet et objectifs scientifiques***

***Structuration en départements et en groupes de recherche***

***Moyens mis en œuvre pour atteindre les objectifs***

## Auto-analyse du laboratoire

Cette auto-analyse a pour objectif d'effectuer un diagnostic sans concession du laboratoire, que ce soit en matière scientifique ou en matière administrative et de gestion, afin d'identifier les différents points sur lesquels s'appuyer pour la stratégie future.

### Points 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 ou des microsystèmes et de la microbiologie (piles à combustibles microbiennes, approches métagénomiques liées au marquage d'ADN par nanoparticules magnétiques)*

Ampère se situe à la croisée de 3 disciplines scientifiques, Génie Electrique (GE), Automatique (A) et Microbiologie environnementale (ME), avec une volonté forte de développer des recherches aux interfaces, tout en conservant une excellence dans les disciplines de base. Comme le montrent certains indicateurs (voir partie bilan), même si elle est débutante, cette inter- et pluri-disciplinarité est bien réelle, et confère à Ampère une place originale dans le paysage scientifique français, et ceci avec un certain succès. Nos objectifs consistent à continuer vraiment dans cette direction, par une politique incitative affirmée, en renforçant les liens existants (entre GE et A, entre GE et ME) et en en créant de nouveaux (entre A et ME).

- *Une forte dynamique*
- *Regroupe presque tout le potentiel lyonnais en Génie Electrique de Lyon*
- *Spectre scientifique large, ce qui permet une mobilisation rapide pour des recherches prioritaires*

Les indicateurs sont éloquentes : de 81 personnes en 2003, Ampère est passé à 173 personnes en 2009, faisant plus que doubler ses effectifs en 6 ans. Aujourd'hui, le laboratoire Ampère est devenu attractif, récompensant l'effort de regroupement de forces scientifiques de la place lyonnaise, et la qualité et l'originalité des recherches qui y sont menées. Notre volonté est de poursuivre cette expansion avec la même dynamique, en comptant sur l'inventivité, l'originalité et la qualité de nos travaux pour recruter de nouveaux chercheurs ou enseignants-chercheurs, et pour intégrer des équipes ou chercheurs séduits par la politique d'Ampère. Outre le fait que cette dynamique a donné à Ampère une assise forte en termes de moyens humains, elle lui confère tous les atouts pour mobiliser sur un projet que l'on estime prioritaire des compétences pluri-disciplinaires uniques dans le paysage scientifique français.

- *Des axes scientifiques reconnus : modélisation, intégration de puissance en SiC, Haute tension, Fluid Power, métagénomique et adaptation bactérienne*
- *Deux thématiques à fort enjeu sociétal et qui révolutionneront notre société dans les années à venir: la bioingénierie et l'intégration en électronique de puissance*

Ces axes, pour lesquels les chercheurs d'Ampère sont historiquement reconnus, doivent être confortés, parce que garants des disciplines sur lesquelles s'appuient les recherches inter- et pluri-disciplinaires développées à Ampère. Celles-ci ne peuvent en effet se concevoir que si chacune des composantes peut continuer à développer des recherches relevant purement de sa discipline, afin de conserver une excellence dans son propre domaine, et la mettre à profit pour nourrir les actions transversales communes.

D'autre part, Ampère possède deux atouts majeurs dans le spectre de ses recherches, deux thématiques scientifiques appelées à un fort développement dans les années à venir du fait de leurs retombées sociétales et qui révolutionneront notre société à terme :

- La bioingénierie se définit comme l'application des concepts et des techniques de l'ingénierie aux systèmes biologiques, dans les domaines des Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement. Ce domaine n'est certes pas nouveau puisque, par exemple, l'industrie met en œuvre depuis de nombreuses années des bioréacteurs. Cependant l'amélioration très rapide des connaissances du fonctionnement du vivant est

et sera de plus en plus à la source d'une approche maîtrisée et raisonnable des systèmes biologiques pour répondre à des besoins sociétaux. En se limitant au monde bactérien du sol, les progrès constants de la génomique permettent une compréhension de plus en plus poussée des mécanismes qui gouvernent les écosystèmes. Si on garde simplement à l'esprit qu'une fraction très faible (quelques pour cents) des espèces bactériennes est connue, on réalise que l'identification de nouveaux gènes d'intérêt va bénéficier des approches métagénomiques en cours, que le potentiel génétique à découvrir est énorme et l'exploitation future en termes de programmes de bioingénierie considérable. On peut légitimement penser que la contribution de la bioingénierie à la résolution des grands enjeux environnementaux à l'échelle de la planète sera capitale (l'énergie, l'eau de qualité, la réhabilitation des sols agricoles et industriels), et pour être crédibles ces programmes de bioingénierie et d'ingénierie écologique doivent nécessairement être pluridisciplinaires. Les applications sont aussi très proches de nos préoccupations de tous les jours, que ce soit par exemple dans le développement de dispositifs permettant de traiter les effluents domestiques tout en produisant une quantité d'énergie non négligeable à l'échelle de l'habitat. La bioingénierie apportera ainsi sa contribution à l'habitat autonome en énergie et respectueux de son environnement.

- L'intégration en électronique de puissance : les convertisseurs de puissance sont déjà omniprésents aussi bien auprès du grand public que dans l'industrie. Pour les décennies à venir, l'intégration de puissance ouvre de nouvelles perspectives qui pourront changer profondément notre société. La compacité des convertisseurs permettra de les rendre invisibles, par exemple en les intégrant dans la prise d'alimentation d'un appareil nomade ou bien sur l'actionneur lui-même pour les puissances plus élevées. Le fonctionnement de convertisseurs à de plus hautes températures permettra de nouvelles architectures de systèmes embarqués plus économes en énergie car plus légers. Par ailleurs, la disponibilité de convertisseurs à très haut rendement (99%) permettra d'améliorer l'efficacité énergétique globale des applications statiques (industrie, habitat, production d'énergie) où la masse n'est pas critique. La présence de l'électronique de puissance à tous les niveaux du transport et de la distribution de l'énergie facilitera la généralisation de la production décentralisée d'énergie liée au développement des énergies renouvelables. En rêvant un peu, on peut imaginer à terme que les progrès réalisés en intégration pour les faibles puissances, accompagnés de progrès dans le domaine de la transmission d'énergie sans fil et dans la maîtrise de l'interaction des champs électromagnétique et du vivant (domaines sur lesquels Ampère travaille actuellement), conduiront à un monde « sans fil d'alimentation », notamment pour les appareils nomades, avec une continuité de la gestion de l'énergie aux plus près des fonctions.

## Points faibles

- *Une forte dynamique, impliquant une gouvernance et une structuration pas forcément adaptée à la nouvelle taille et au développement souhaité*

Le défi que s'était lancé Ampère lors du dernier plan quadriennal de fortement axer sa politique sur la pluridisciplinarité en intégrant en son sein 3 groupes distincts (CEGELY, LAI, Microbiologie environnementale) est d'ores et déjà gagné. Aujourd'hui, le défi consiste à réussir la totale intégration de ces différentes composantes pour en faire une véritable entité fonctionnelle. Une des premières tâches sera de constituer une véritable équipe de direction de l'unité Ampère susceptible d'assurer son avenir collectif. En effet, l'éclatement de l'unité sur deux sites géographiques distincts, combiné aux charges d'enseignement, de recherche et administratives des personnels, font qu'il est quasiment devenu impossible de réunir en même temps tous les membres d'un Comité de Direction dès que celui-ci comprend un nombre conséquent de membres. L'expérience des dernières années nous incite à fortement resserrer la gouvernance de l'unité pour la rendre plus efficace, de mieux l'adapter à la pluridisciplinarité souhaitée (aujourd'hui par exemple, aucun microbiologiste ne fait partie du Comité de Direction). D'autre part, comme l'ont montré les analyses SWOR de chacune des équipes, certains découpages tels qu'imaginés il y a 2 ans ne se sont pas révélés adéquats. En particulier, les frontières entre les équipes *Actionneurs et systèmes*, *Commande*, et *Modélisation* ne sont pas très claires, ce qui nuit à la lisibilité globale du laboratoire. D'une manière générale, la structure qui était la nôtre ne mettait pas assez en valeur les différentes recherches transversales que nous avons développées, ce qui était pourtant le fil directeur de notre politique de développement.

- *Effectif limité compte tenu de l'étendue des activités : certaines équipes ou groupes ont une taille sous-critique (haute tension par exemple)*

Le plan de ressources humaines pour le prochain quadriennal devra tenir compte de ces éléments, après une analyse sans concession des raisons ayant conduit à cet état de fait, ainsi que de la viabilité et de la pertinence de ces activités.

- *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*

L'implantation géographique constitue un des principaux points faibles du laboratoire Ampère. L'éparpillement des équipes dans 4 bâtiments situés sur deux sites distincts a été le principal frein au développement d'une véritable identité d'une jeune unité (création en 2007), qui souffre aussi des modes de financement actuels de la recherche qui font une large place aux réponses aux appels d'offre: Malheureusement, chercheurs et enseignants-chercheurs, dans leur grande majorité, affichent leur appartenance à un établissement plutôt que leur rattachement à leur UMR, entraînant dans cette logique les doctorants pour qui la notion d'unité de recherche est encore plus floue. Etablir une véritable identité, donner une âme au Laboratoire Ampère et faire en sorte que chacun s'y reconnaisse constituent assurément le défi majeur qu'il faudra relever lors du quadriennal 2011-2014. Considérant que les projets de regroupements liés au plan campus ne pourront se réaliser qu'au mieux, dans une dizaine d'années, Ampère se doit de se construire dans sa configuration actuelle avec au mieux un regroupement dans 2 bâtiments sur 2 campus différents (Doua et Ecully).

- *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 quatre 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 était en plein essor.*

Ces points dépassent largement les prérogatives d'une seule unité de recherche comme l'est Ampère. Nous défendons depuis la création du CEGELY en 1992 le fait que chaque établissement doit s'approprier l'ensemble des recherches du laboratoire, et ceci quel que soit l'établissement où ces recherches sont effectuées. Force est de constater que ce n'est pas toujours le cas. Force est également de constater que développer des recherches nouvelles, originales, rompant avec les traditions ancestrales des établissements (la bioingénierie à l'ECL en particulier) n'est pas simple et peut difficilement se faire sans un soutien fort de l'établissement, en matière de ressources humaines notamment.

- *Ressources contractuelles directes avec les industriels faibles : 21% en 2006-2008.*

Ce point dépasse aussi largement les prérogatives d'Ampère. Il apparaît aujourd'hui que les industriels de nos différents domaines préfèrent financer leurs recherches à travers des projets institutionnels ou labellisés (ANR, DGE, FUI, FRAE) plutôt que de contracter directement avec les laboratoires.

- *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.*

Depuis plusieurs années, nous participons à la fête de la science, nous ouvrons le laboratoire à chaque occasion possible (visite des parents lors de la rentrée à l'ECL par exemple). Ceci fait partie de notre mission vis-à-vis de la Société, et doit contribuer à terme à améliorer notre image de « science poussiéreuse » pour certaines de nos activités et « d'apprenti sorcier » pour ce qui a trait à la biologie. Mieux communiquer sur nos recherches fait également partie de nos priorités, et

l'originalité des recherches menées à Ampère (bioingénierie, intégration de puissance, ...) est un atout qu'il nous faudra encore plus exploiter pour mieux attirer les jeunes.

- *Automatique (notamment les aspects fondamentaux) peu visible, à Ampère et sur Lyon*
- *Une lisibilité des recherches menées, notamment disciplinaires, quelques fois difficile à trouver*

La nouvelle structure du Laboratoire devra prendre en compte ce point particulier. D'autre part, pour le prochain quadriennal, des synergies devront être recherchées avec le LAGEP (UMR 5007).

- *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*

Le plan campus peut être une opportunité forte pour le Laboratoire Ampère de réunir les 3 composantes situées sur le domaine de la Doua (situées au bâtiment Oméga à l'UCBL et aux bâtiments Saint Exupéry et Léonard de Vinci à l'INSA) en un seul bâtiment. La proximité thématique du Génie électrique avec la Thermique peut nous permettre d'envisager un rapprochement géographique avec le CETHIL (Centre de thermique de Lyon, UMR 5008), dans le cadre du projet Neptune, qui vise à expérimenter les principes du Développement Durable dans les réaménagements envisageables à l'échelle d'un quartier, avec mise en œuvre effective pour un ensemble de bâtiments et espaces abritant les laboratoires impliqués dans le pôle Energie-Environnement de l'INSA. Si chacun des 2 laboratoires, isolé, n'a pas un poids suffisant pour être prioritaire dans les regroupements à venir, on peut espérer que les 2 laboratoires réunis sur un projet cohérent seront mieux entendus.

- *Démarche système : être capable de traiter presque tous les aspects scientifiques 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.*

Ceci constitue un réel problème aujourd'hui. Il convient de bien prendre conscience de l'implication des modes actuels de financement de la recherche sur le fonctionnement d'une unité de recherche. Ampère a parfaitement su s'adapter aux changements récents de politique de financement et le laboratoire n'a jamais été aussi bien doté en moyens financiers. Cependant la plus grande partie des crédits est attribuée pour la réalisation de projets contractuels, avec donc un contrôle strict de la façon dont ils sont utilisés. Cette politique limite grandement la possibilité de développer des recherches amont, fondamentales, avec une part de risques plus importante et des délais de réalisation plus longs. Elle limite surtout la possibilité de développer les projets largement pluridisciplinaires peu attractifs pour les agences de financement contraignant le laboratoire à se suffire des « faibles » dotations récurrentes des tutelles, largement ponctionnées par les établissements. Il est essentiel qu'une partie des crédits soit réaffectée à l'émergence de sujets innovants, et pour cela, il faut encore et toujours inventer des stratégies de contournement, consommatrices d'énergie et de temps (voir « stratégie d'innovation » dans la partie bilan).

- *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, la cohésion semble être plutôt une nécessité imposée par l'appartenance au CNRS qu'une véritable volonté de travailler ensemble*

Le véritable ciment du laboratoire Ampère, aujourd'hui, est l'association au CNRS. Il est évident qu'un changement drastique de la vision des tutelles, et du CNRS en particulier, pourrait conduire à un éclatement du laboratoire en des équipes appartenant à des établissements différents. C'est

la raison pour laquelle il nous faut aujourd'hui travailler à donner une âme au laboratoire, à travers une identité forte dans laquelle chacun se reconnaisse.

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

Ce point, amplifié par le mode de financement actuel de la recherche, sur projets, qui rend les chercheurs indépendants financièrement et par conséquent moins solidaires, nécessitera une surveillance particulière de la part de la Direction du Laboratoire. Par ailleurs, de paire avec la masse sous-critique sur certaines actions, il sera nécessaire de veiller à la pertinence des projets et leur rayonnement.

## **Projet et objectifs scientifiques du laboratoire**

### **Déclaration de politique générale**

D'une manière générale, les recherches menées au laboratoire Ampère ont pour objectif **l'ingénierie écologique et l'ingénierie des systèmes mécatroniques, en incluant leur efficacité énergétique et leurs interactions avec l'environnement** :

- Le vecteur qui permet le transport de l'énergie peut être électrique, pneumatique ou hydraulique. Le dénominateur commun de nos 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 peuvent être mécatroniques ou biologiques. Ils sont généralement multi-physiques, et nécessitent une modélisation multi-domaines et multi-échelle.
- La relation de ces systèmes entre eux ou avec leur environnement est fondamentale, et il est indispensable de savoir gérer leurs interactions.
- La démarche développée au laboratoire 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**. Elle est basée à la fois sur une modélisation des différents phénomènes, pouvant nécessiter le développement de méthodes et d'outils spécifiques, et sur une expérimentation adaptée, à travers nos différentes plate-formes et centres d'essais. D'une manière générale, 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.

Nos activités scientifiques pour le quadriennal 2011 – 2014 se situent dans la continuité des activités actuelles, avec **deux objectifs stratégiques majeurs** :

- Maintenir la dynamique actuelle, en termes de moyens humains et financiers, mais aussi en terme de recherches innovantes.
- Consolider et étendre l'inter- et la pluridisciplinarité d'Ampère, véritable image de marque du laboratoire, en la basant sur des socles disciplinaires forts.

Si le spectre des recherches reste large, avec des domaines allant de l'Automatique au Génie Électrique, en passant par l'Electromagnétisme et la Microbiologie environnementale, **deux priorités scientifiques** sont affichées ; ces priorités, qui s'appuient sur le développement d'un socle méthodologique fort lié à l'ingénierie des systèmes, visent à :

- Développer les concepts et techniques de l'ingénierie pour les appliquer aux systèmes biologiques (priorité *bioingénierie*, portée par les départements Bioingénierie et Méthodes pour l'ingénierie des systèmes).
- Intégrer les systèmes de puissance en améliorant leur efficacité énergétique et leur fiabilité (priorité *intégration de puissance*, portée par les départements Energie électrique et Méthodes pour l'ingénierie des systèmes).

## Développement d'un axe transversal « Sciences et société »

### Contexte et problématique

**Questions.** Des questions générales constituent le contexte de cet axe : « *Comment orienter la recherche ? Quel est le rôle des dimensions sociétales ? (quel est le sens du terme lui-même ?). Une demande sociale existe-t-elle ? Comment l'identifier, la « décoder » ? Qui est légitime pour le faire, Qui décide ? Qui contrôle ??? Quelle est la place des chercheurs dans les décisions ? Celle des « décideurs » ? Ces questions brutes ne constituent pas une problématique, d'ailleurs s'agit-il d'une question « purement scientifique » ? Probablement pas.* Ces questions ne peuvent qu'être ouvertes et les réponses multiples. L'axe Sciences et Société mis en place à Ampère sera une composante importante de nos efforts pour traiter ces questions et y apporter des éléments de réponses. Cet axe inscrit bien sûr son programme dans l'évolution récente du CNRS et des Universités et grandes écoles. Les nouveaux outils visant à favoriser l'interdisciplinarité seront utiles et vont dans le sens d'une amélioration et d'un renouvellement des relations Sciences et Société.

**Contraintes.** On sait qu'il ne s'agit pas de chercher seulement aux pieds des lampadaires (zone éclairée par les appels d'offre). On sait aussi que les recherches ne sont pas orientées « naturellement » par la logique même de la discipline, qui consiste à approfondir la connaissance. On sait enfin que les orientations scientifiques ne sont que rarement, en tout cas pas uniquement, tranchées par l'intuition du chercheur ou par l'élan et la dynamique de l'équipe (et de l'ordre établi).

La situation dominante de la recherche est d'être socialement finalisée (cf Partie Auto-analyse, § points faibles : « *Plus de 90% des financements d'Ampère sont obtenus sur projets avec des crédits fléchés* »). Non seulement les choix scientifiques sont sur-guidés pas les appels d'offre, mais les filières piégeantes « des postes », les critères d'évolution de carrières ainsi que les stratégies concurrentes des tutelles constituent autant de leviers d'éclatement, d'éparpillement, d'obstacles permanents et renouvelés à une orientation scientifique autonome identifiée et durable.

**Défi.** C'est dans ce contexte global que se posent aussi des questions spécifiques au Laboratoire Ampère. Le défi est le suivant : Comment faire pour qu'un laboratoire constitué de plus de 180 personnes, installé sur 2 campus, dépendant de 4 tutelles, logé dans 4 bâtiments, hébergeant 3 grandes disciplines, construite et fasse exister une véritable vie intellectuelle collective ? Comment faire pour que ce bouillonnement intellectuel soit aussi un facteur d'unification et dégage une cohérence ? Comment faire pour que cette vie intellectuelle constitue un élément décisif de ses choix scientifiques, de ses priorités, de sa vie quotidienne et relationnelle, et contribue à terme à la construction de l'identité collective du laboratoire ? Comment construire et entretenir un sentiment d'appartenance fondé et faire vivre une collaboration professionnelle efficace sur le plan scientifique et épanouissante pour les personnes ?

### Objectif

Il n'y a pas de réponse unique et miraculeuse à de telles questions. Pourtant la situation n'est pas complètement désespérée. Une vie intellectuelle commune, structurée mais souple, un investissement important et continu dans l'approfondissement de ces questions et dans l'échange entre les membres d'Ampère, du directeur aux doctorants en passant par toutes les personnes soutenant l'activité scientifique, peuvent constituer un ferment important et efficace.

**L'objectif de l'axe Sciences et Société mis en place à Ampère est de contribuer au développement et à la vie d'une identité intellectuelle commune et partagée.** Elle trouve ses racines dans l'explicitation, l'approfondissement et l'expression des relations entre le laboratoire et la société qu'il sert et qui lui permet d'exister.

L'identité d'Ampère est dans la recherche itérative et continue de réponses à la question commune : « A quoi, et qui, sert Ampère ? », et aux questions personnelles pour chaque membre du laboratoire : « En quoi être à Ampère me permet de mener des recherches utiles et intéressantes, mieux qu'ailleurs et autrement ? ». Réfléchir collectivement à ces questions est aussi le prix à payer pour que se tisse une confiance mutuelle entre les membres du laboratoire. Cette confiance est un ciment nécessaire à un travail en équipe. Il constitue pour chacun le dividende justifié de l'investissement personnel consenti pour le collectif : on parlera plutôt de « démocratie scientifique responsable » ou de « chercheur citoyen ».

## Actions prévues et mise en oeuvre

L'axe transversal Sciences et Société sera étroitement intégré au dispositif d'animation et de direction de la nouvelle organisation d'Ampère. L'implication de la direction d'Ampère est constitutive et stratégique pour cet axe transversal. Par nature et mission, il concerne l'ensemble du laboratoire. Il faut noter que la nouvelle structuration en départements et groupes de recherche sera aussi plus favorable dans la mesure où elle ouvre un champ important de vie collective et offre une structure appropriée à un fonctionnement plus collectif que des équipes juxtaposées (voir partie « structuration en départements et groupes de recherche »). Les différentes actions prévues sont :

### 1. Séminaire Ampère

Un séminaire de laboratoire n'est pas une suite de conférences scientifiques ! Tous les participants, et parfois les intervenants eux-mêmes, sont des membres d'une même entité, le laboratoire. A ce titre il ne peut s'agir de simples échanges de connaissances, même pointues. La dimension « pilotage collectif » des orientations de recherche doit toujours être au centre de la réflexion, même si l'application n'est pas immédiate. Il faut plutôt comparer l'activité en séminaire à l'Abbaye de Thélème ou à l'Agora d'Athènes : espace de vie et de co-décision sur la base d'un savoir communiqué.

Chaque séminaire sera préparé à distance avec l'intervenant et localement par la lecture de textes utiles à une participation active. Chaque séance sera synthétisée dans un document regroupant les supports de l'intervention mais aussi par un résumé des débats. La participation au séminaire est « civiquement » obligatoire pour chaque membre du laboratoire, et la participation active des doctorants sera favorisée (en coordination avec la communauté des doctorants d'Ampère devant être mise en place).

- Trois grands types de séances seront mis en places :
  - **Thèmes scientifiques**
    - Disciplinaires : Chaque groupe peut présenter des recherches en cours ou ses résultats. Il pourra aussi proposer un intervenant externe à Ampère mais de son domaine.
    - Interdisciplinaires : Un département, ou plusieurs, peut présenter une action interdisciplinaire ou inviter un conférencier extérieur à Ampère mais contribuant à la réflexion sur une activité scientifique croisant des disciplines rassemblées à Ampère. Ce type de séances fait donc appel à des intervenants internes ou externes.
  - **Epistémologie des sciences** : histoire des sciences, sociologie des sciences, philosophie des sciences, politique et sciences. Ce type de séance a pour objectif la construction critique de connaissances, concepts et outils permettant un dialogue entre scientifiques de disciplines différentes en développant une culture partagée et intelligible. Il s'agit de dépasser les blocages basiques de l'interdisciplinarité relevant des difficultés de compréhension et de vocabulaire entre les disciplines. Les intervenants peuvent être d'origines très variées. Pour les participants, ces séances ont une dimension formative. Cela est vrai bien sûr pour les doctorants mais aussi pour les chercheurs eux-mêmes qui peuvent y trouver –et apporter– des connaissances et des échanges, dans et hors de leur domaine de recherche, que n'offrent pas les conférences scientifiques « classiques ». De ces points de vue, le séminaire a pour ambition de n'être pas seulement un espace d'échange de connaissances scientifiques, mais aussi un processus contribuant à leurs élaborations
  - **Rapport des sciences à la société et débats** : Cette dernière catégorie est plus diverse mais tout aussi ambitieuse. Il ne s'agit pas d'y enfermer les débats mais de leurs offrir des opportunités légitimes et collectives de se développer. Ces séances visent à mettre en place des passerelles entre Ampère et la Société. Pourront y être invités des acteurs sociaux variés : associatifs, industriels, politiques, et enfin penseurs et créateurs contestataires. Des sujets originaux y seront abordés : financement de la recherche, rapports art/science/société, flambée médiatique liée aux recherches menées à Ampère (Champs électromagnétiques, Maîtrise du vivant...).
- **Rythme** : 2 séminaires / mois soit environ 20 séances / an.
- **Durée** : 2 à 3 heures / séance.

Il s'agit donc d'une action lourde, à préparer, mettre en oeuvre et faire vivre. Pour avoir des chances raisonnables de succès le séminaire impliquera un investissement fort de chacun. La vie d'un laboratoire aussi important et divers est aussi à ce prix. Les séminaires existants déjà organisés par des équipes (Actionneurs et systèmes / Commande) seront insérés dans le séminaire Ampère selon des modalités à préciser, de même que les réunions actuelles inter-équipes, dites « Think tank ». Le

séminaire d'Ampère a des ambitions qui peuvent intéresser au-delà de ses membres. Selon les cas, le séminaire pourra être étendu à des cercles plus larges. Par ailleurs, chaque département créera un minimum d'espace de réflexion nécessaire à la maturation de sa prospective. L'ensemble des séminaires, dont les buts sont clairement différents, doit contribuer à donner au chercheur le temps nécessaire à son recul par rapport à ses recherches et l'agrégat de sa réflexion aux intérêts scientifiques du laboratoire.

## 2. Actions « Science et Société »

Même dans le domaine des « sciences exactes » et de l'ingénierie, pour avoir quelques chances de réussite, les propositions doivent « afficher » des ambitions sociétales –et là les SHS peuvent être utiles-. Au-delà de cette contrainte « utilitariste et opportuniste » pesant sur tous les laboratoires et tuant en général dans l'œuf la motivation pour les SHS de s'y associer, le laboratoire Ampère recherche sa consolidation et la construction de son identité profonde dans la réponse aux questions que pose son utilité sociale, entraînant par là même la légitimité d'un tel volet d'action. C'est parce qu'Ampère accepte d'investir ce champ d'action et d'en assumer les risques qu'il peut espérer que des compétences SHS s'y associent.

**Projets et contrats.** Un premier domaine de réflexion et d'action sera celui des réponses aux appels d'offre. Il s'agira d'abord d'analyser la cohérence scientifique résultant de ces mécanismes (95% des financements contraints). Il s'agira ensuite de préparer et d'infléchir les réponses aux appels d'offre mais aussi d'être « pro-actif » en ne se contentant pas seulement de répondre au mieux aux appels d'offre, mais surtout en travaillant en amont de ceux-ci pour participer à leur élaboration. Ce travail de fond relève des compétences et missions du Comité de direction et du Conseil Scientifique d'Ampère. L'axe Sciences et Société s'associera à ces travaux.

La nouvelle organisation et répartition des responsabilités (sites, départements, groupes de recherche), constituera le cadre structurant les processus d'anticipation et de suivi qu'une telle ambition suppose.

**Articulation Recherche-Enseignement.** Une orientation mérite d'être soulignée, elle concerne l'articulation Recherche-Enseignement. La désaffection des « jeunes » pour les formations scientifiques et la recherche ne sera pas comblée uniquement par des démarches de sensibilisation dans les maternelles, les lycées ou les banlieues. Si le laboratoire Ampère continuera à s'associer à ce type d'actions, il souhaite également entamer une réflexion stratégique sur le thème Recherche-Enseignement. Ce seront les responsables de sites du laboratoire, au sein du Comité de Direction, qui, au-delà du suivi quotidien des relations Recherche-Enseignement avec leurs tutelles respectives, devront s'emparer de ce thème dans le cadre de l'axe transversal Sciences et Société.

D'autres actions pourront être menées, par exemple une participation active à WikiCNRS.

## 3. Pratiques de communication des chercheurs

Ce troisième volet de l'axe Science et Société concerne la poursuite et l'extension d'une recherche, déjà en cours, menée en collaboration avec le laboratoire C2SO (Communication, Cultures et SOciété, Jeune Equipe de l'ENS-LSH), dans le cadre d'un projet Afsset de l'équipe « Microbiologie et microsystèmes » d'Ampère. L'existence de cette collaboration offre l'occasion de ne pas démarrer de rien une interdisciplinarité entre Sciences Humaines et Sociales et Microbiologie, mais de prolonger une action existante et de l'étendre au Génie électrique et à l'Automatique.

Dans ses dimensions scientifiques SHS, ce projet est centré sur la communication Sciences-Société et plus précisément sur les interactions entre les acteurs de la recherche et les autres acteurs sociaux. Les travaux en cours *portent sur les situations de communication par lesquelles les chercheurs sont en contact des acteurs, dispositifs sociaux et institutions sociales* (Afsset). Or l'apport de compétences SHS est décisif pour la crédibilité d'un axe Science et Société : il ne s'agit en effet pas de s'engouffrer dans les effets de mode ou d'opportunisme visant à couvrir d'un vernis de légitimité sociale des recherches technologiques ou biologiques collant au « mieux disant sociétal » réclamé par la plupart des appels d'offres.

Un accord scientifique est établi entre C2SO et Ampère, mais les forces effectivement mobilisables restent à étayer. Une des pistes possibles pourrait consister à associer à cette recherche, et plus généralement à l'axe Science et Société d'Ampère, les compétences en SHS, rares et précieuses dans notre contexte universitaire et scientifique, qui sont déjà présentes à l'ECL (psychologie, philosophie, sociologie, issues en partie de l'ex-laboratoire ICTT et intégrées aujourd'hui dans le département « Communication Langages Entreprise Sports » de l'ECL). Des compétences similaires existent aussi à l'INSA et à l'UCBL. Il faut aussi voir comment ces recherches et actions pourraient s'intégrer dans celles de l'ISCC (Institut des Sciences de la Communication du CNRS, institut INSIS

du CNRS) et bénéficier de son soutien. Sans cette composante scientifique en SHS de l'axe transversal Sciences et Société, il sera impossible d'appuyer les objectifs poursuivis sur une dimension scientifique interdisciplinaire et sérieuse. Les moyens humains, à rechercher dans des démarches d'associations et de partenariats, constituent l'enjeu principal de ses chances de succès.

### Evaluation de l'axe transversal « Sciences et société »

Le principal indicateur de l'activité transversale Séminaire scientifique sera la participation des membres du laboratoire à ces séances, mais un suivi qualitatif sera aussi organisé (enquête annuelle interne auprès des membres, qualité et régularité des CR, réactions des invités extérieurs...). Cette évaluation servira de base pour adapter le programme de l'année suivante. La même approche sera mise en place pour les actions S&S La recherche sur les pratiques de communication d'Ampère et de ses chercheurs sera évaluée selon les critères scientifiques classiques (publications...). Ses apports au fonctionnement collectif du laboratoire seront traités en Comité de direction.

### Conclusion : nos ambitions pour 2011-2014

- Avancées significatives dans nos 2 priorités scientifiques
- Création d'une véritable identité pour le laboratoire Ampère
- Mise en place d'une nouvelle gouvernance mieux adaptée à la taille du laboratoire et à sa pluridisciplinarité
- Création d'une véritable communauté de doctorants d'Ampère
- Mise en place d'une démarche qualité au sein du Laboratoire
- Regroupement des 3 bâtiments occupés par Ampère sur la Doua (Omega, Léonard de Vinci, Saint Exupéry) en 1 seul bâtiment.
- Mise en place d'un collégium ST2I à Lyon, dans lequel Ampère doit jouer un rôle moteur, allant de pair avec un renforcement de sa place dans l'Institut Carnot I@L.

### Structuration en Départements et en groupes de recherche

Pour répondre aux enjeux majeurs des années à venir et à nos ambitions en terme de projet scientifique, nous avons décidé de donner une nouvelle structure au laboratoire Ampère. Ce choix s'appuie sur les constats suivants (voir l'auto-analyse) :

- *Une forte dynamique, impliquant une gouvernance et une structuration pas forcément adaptée à la nouvelle taille et au développement souhaité*
- *Certains découpages tels qu'imaginés il y a 2 ans ne se sont pas révélés adéquats. Les frontières entre les équipes Actionneurs et systèmes, Commande, et Modélisation ne sont pas très claires.*
- *Certains groupes ou équipes ont une taille sous-critique (haute tension par exemple)*
- *Une lisibilité des recherches menées, notamment disciplinaires, quelques fois difficile à trouver*

C'est pourquoi le laboratoire sera restructuré en Départements et Groupes de recherche :

- Les **départements** définissent les thématiques de recherche du laboratoire.
- Les travaux du laboratoire sont conduits par les **groupes de recherche**, qui sont essentiellement disciplinaires. Chaque groupe participe à un département du laboratoire.

Les recherches disciplinaires, c'est à dire la science de base, sont faites au sein des groupes, alors que les recherches transversales sont faites au sein des départements ou entre départements.

Si l'inconvénient majeur de cette nouvelle structuration est l'ajout d'une strate supplémentaire, les plus-values apportées par une telle structuration sont nombreuses :

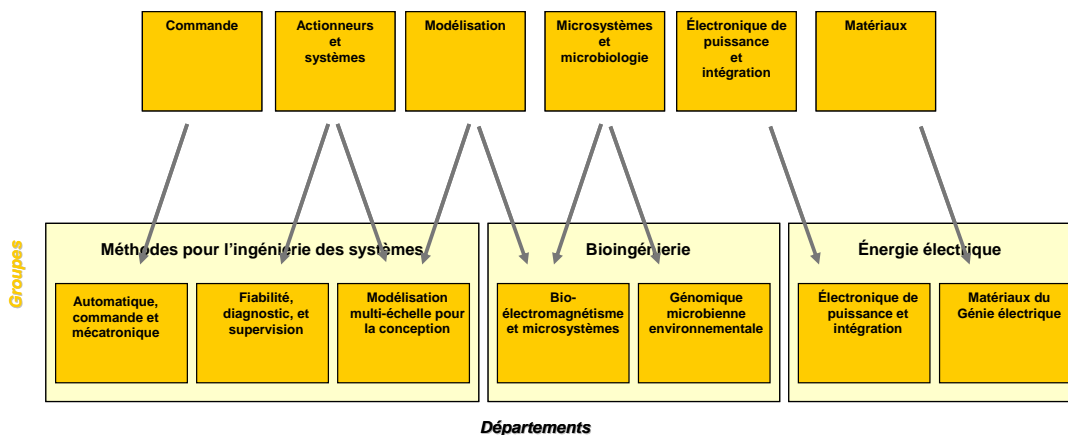
- Les activités deviennent très lisibles, en mettant en évidence les recherches disciplinaires, au sein des groupes, et les recherches transversales, réalisées au sein des départements.
- Cette nouvelle structuration offre un cadre naturel à la pluri-disciplinarité.
- La question de la frontière entre groupes d'un même département devient moins primordiale que s'il n'y avait que des équipes, ces groupes appartenant au même département.
- La Direction du laboratoire est resserrée ; les aspects administratifs, pris en charge par les responsables de site, et les aspects scientifiques, pris en charge par les responsables de département, sont gérés au même niveau, au sein du Comité de Direction.
- Il est très aisé de faire évoluer des groupes, et ceci sans changer la structure. Celle-ci s'en trouve donc pérennisée.

## Nouvelle structure : 3 Départements et 7 groupes de recherche.



- Par rapport à 2007-2010, trois équipes sont inchangées et deviennent des groupes : l'équipe Commande devient le groupe *Automatique, commande et mécatronique*, et les équipes *Electronique de puissance et intégration* et *Matériaux* deviennent les groupes du même nom.
- L'ancienne équipe Actionneurs et systèmes se divise en deux (l'auto-analyse de l'équipe indiquait que *le spectre trop large de l'équipe n'a pas conduit à une fusion parfaite et 2 groupes distincts ont émergés...*): une partie fonde le groupe *Fiabilité, diagnostic et supervision*, et l'autre partie rejoint une partie des chercheurs de l'équipe *Modélisation* pour créer le groupe *Modélisation multi-échelle pour la conception*.
- L'ancienne équipe Microsystèmes et microbiologie est dédoublée : le groupe des microbiologistes forme le groupe *Génomique microbienne environnementale*, alors que les chercheurs spécialisés dans les microsystèmes rejoignent les chercheurs de l'équipe *Modélisation* spécialisés dans le domaine de l'interaction champ-vivant pour constituer le groupe *Bioélectromagnétisme et microsystèmes*.
- L'ancienne équipe Modélisation est donc dée en deux, les chercheurs spécialisés dans le domaine de l'interaction champ-vivant rejoignant le groupe *Bioélectromagnétisme*, et les chercheurs ayant une approche plus systémique rejoignant le groupe *Conception*.

### EQUIPES DE RECHERCHE (2007-2011)



En terme de personnels, la nouvelle structuration aboutit à la répartition suivante :

### Département Méthodes pour l'ingénierie des systèmes

Responsables: Eric BIDEAUX

Objectif: développer des méthodologies d'analyse et de synthèse pour une conception maîtrisée intégrant les contraintes de commande, de fiabilité et de suivi pour des systèmes multi-physiques en relation avec leur environnement

#### Automatique, commande et mécatronique

Responsable: Xavier BRUN

Objectifs: développement d'outils méthodologiques pour l'analyse et la commande de systèmes dynamiques complexes, transfert et adaptation aux systèmes mécatroniques

Mots clés: automatique, commande, optimisation, identification, estimation, observation, capteur logiciel, planification de trajectoires, robustesse, robotique médicale, systèmes pneumatiques, systèmes hydrauliques

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
BLANCO	Eric	MCF	ECL	
BRUN	Xavier	MCF	INSA	
DI LORETO	Michael	MCF	INSA	
LIN SHI	Xuefang	PU	INSA	HDR
MARQUIS-FAVRE	Wilfrid	MCF	INSA	HDR
MOREAU	Richard	MCF	INSA	
PHAM	Minh Tu	MCF	INSA	
REDARCE	Tannequy	PU	INSA	HDR
SCORLETTI	Gérard	PU	ECL	HDR
SMAOUI	Mohamed	MCF	INSA	
THOMASSET	Daniel	PU	INSA	HDR

#### Fiabilité, diagnostic et supervision

Responsable: Pascal VENET

Objectifs: maîtriser la Sûreté de Fonctionnement des composants et des systèmes au travers des indicateurs de sûreté et des moyens assurant le fonctionnement

Mots clés: systèmes de stockage d'énergie électrique, actionneurs, mécanismes de défaillance, fiabilité, maintenance prédictive, intelligence artificielle, reconnaissance de formes, systèmes à événements

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
BOUTLEUX	Emmanuel	MCF	ECL	
CLERC	Guy	PU	UCBL	HDR
DUMITRESCU	Emil	MCF	INSA	
NIEL	Eric	PU	INSA	HDR
PIETRAC	Laurent	MCF	INSA	
RAZIK	Hubert	PU	UCBL	HDR
VENET	Pascal	PU	UCBL	HDR
YAHOU	Hamed	MCF	UCBL	HDR

#### Modélisation multi-échelle pour la conception

Responsable: Laurent KRAHENBUHL

Objectifs: développer des méthodes et outils numériques pour l'aide à l'analyse des performances, la conception et l'optimisation des systèmes pluridisciplinaires de transmission de puissance en tenant en compte des contraintes d'incertitude, d'échelle de temps ou d'espace et de temps de calcul

Mots clés: modélisation multi-physique et multi-échelle, éléments finis, optimisation paramétrique, couplage modèles 0D/3D, approche conservative en énergie, Bond Graph, modèles inverses, Fluid Power, électromag.

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
BIDEAUX	Eric	PU	INSA	HDR
EBERARD	Damien	MCF	INSA	
KRAHENBUHL	Laurent	DR CNRS	ECL	HDR
NICOLAS	Alain	PU	ECL	HDR
PERRUSSEL	Ronan	CR CNRS	ECL	
SIMON	Jean-Pierre	MCF	INSA	
VOLLAIRE	Christian	PU	ECL	HDR

### Département Energie électrique

Responsable: Charles JOUBERT

Objectif: améliorer les dispositifs de transport, de distribution et de conversion de l'énergie électrique, dans un souci de protection de l'environnement : augmentation du rendement et/ou écoconception

#### Electronique de puissance et intégration

Responsable: Dominique PLANSON

Objectifs: amélioration des convertisseurs statiques de l'énergie électrique : amélioration de l'efficacité énergétique, augmentation de la tenue en tension, fonctionnement à de plus hautes températures ambiantes, diminution de l'encombrement et du coût, réduction des perturbations électromagnétiques et du volume

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

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
ALLARD	Bruno	PU	INSA	HDR
BERGOGNE	Dominique	MCF	UCBL	
BREVET	Olivier	MCF	St Et.	
BROSSELDARD	Pierre	MCF	INSA	
BUTTAY	Cyril	CR CNRS	INSA	
JOUBERT	Charles	PU	UCBL	HDR
LAZAR	Mihai	CR CNRS	INSA	
MOREL	Florent	MCF	ECL	
MOREL	Hervé	DR CNRS	INSA	HDR
PLANSON	Dominique	PU	INSA	HDR
RAYNAUD	Christophe	MCF	INSA	
TOURNIER	Dominique	MCF	INSA	

#### Matériaux du Génie Electrique

Responsable: Abderrahmane BEROUAL

Objectifs: approfondissement des connaissances sur les phénomènes dans les matériaux, actuels et nouveaux, leur caractérisation et leur modélisation en vue de leur mise en œuvre dans les matériels et systèmes du génie électrique, dans des conditions optimisées et compatibles avec l'environnement

Mots clés: diélectriques-magnétiques-composites, caractérisation expérimentale, modélisation, hystérésis dynamique, prélaquage et claquage diélectrique, foudre, ingénierie haute tension, éco-conception

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
AKA	Thomas	MCF	ECL	
BEROUAL	Abderrahmane	PU	ECL	HDR
MARTIN	Christian	MCF	UCBL	
MOREL	Laurent	MCF	UCBL	
RAULET	Marie Ange	MCF	UCBL	
SIXDENIER	Fabien	MCF	UCBL	

### Département Bioingénierie

Responsables: François BURET, Pascal SIMONET

Objectif: faire émerger de nouvelles méthodes et de nouvelles applications en bioingénierie en s'appuyant sur une synergie entre le Génie Electrique, le domaine des microsystèmes et la Biologie

#### Génomique microbienne environnementale

Responsable: Pascal SIMONET

Objectifs: étudier les mécanismes d'adaptation bactérienne par des approches de (méta-)génomique

Mots clés: adaptation bactérienne, évolution des génomes, métagénomique, sols, transfert horizontal de gènes, analyse de séquences, phylochips, évolution moléculaire, bioinformatique, banques de gènes, ingénierie écologique

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
CEILLON	Sébastien	AI	ECL	
FRANQUEVILLE	Laure	IR CNRS	ECL	
LACROIX	Monique	IR CNRS	ECL	
LAFAY	Benedicte	CR CNRS	ECL	
NAVARRO	Elisabeth	CR IRD	ECL	
SIMONET	Pascal	DR CNRS	ECL	HDR
VOGEL	Timothy	PU	UCBL	HDR

BARTHOLLET	Richard	T	ECL	
------------	---------	---	-----	--

#### Bioélectromagnétisme et microsystèmes

Responsable: Riccardo SCORRETTI

Objectifs: modélisation et caractérisation électromagnétique des systèmes biologiques

Mots clés: modélisation électromagnétique numérique, dosimétrie 3D, maillage complexe, caractérisation électromagnétique des tissus, modèle de cellule, microdosimétrie, microsystèmes, manipulation cellulaire, électroporation, diélectrophorèse, magnétophorèse, bioremédiation, biomédical

Nom	Prénom	Fonction	Etab.	HDR
BURAI	Noël	PU	UCBL	HDR
BURET	François	PU	ECL	HDR
FABREGUE	Olivier	IR CNRS	ECL	
FRENEA ROBI	Marie	MCF	UCBL	
HADDOUR	Naoufel	MCF	ECL	
NICOLAS	Laurent	DR CNRS	ECL	HDR
SCORRETTI	Riccardo	CR CNRS	UCBL	
SIAUVE	Nicolas	MCF	UCBL	
VOYER	Damien	MCF	ECL	

26 permanents

11 PU  
13 MCF  
1 DR CNRS  
1 CR CNRS

18 permanents

4 PU  
11 MCF  
1 DR CNRS  
2 CR CNRS

17 permanents

3 PU  
4 MCF  
2 DR CNRS  
2 CR CNRS  
1 CR IRD  
3 IR CNRS  
1 AI, 1T

## Gouvernance du laboratoire

La gouvernance du laboratoire s'appuie sur 3 piliers : le Comité de direction, le Conseil scientifique, et le Conseil de Laboratoire

### Comité de Direction du Laboratoire

- Rôle : c'est le véritable exécutif du Laboratoire. Il est en charge de l'ensemble de la politique scientifique du laboratoire, de son élaboration à court terme (en s'appuyant sur les travaux du Conseil Scientifique) à sa conduite et à son évaluation. Il est également en charge des relations avec l'enseignement. Il formule des propositions qui sont soumises au Conseil de Laboratoire. Les aspects suivants sont spécifiquement considérés : il est garant de la politique scientifique incitative interne sur les axes transversaux (attribution des prélèvements), il définit les priorités scientifiques dans les recrutements de personnels chercheurs et enseignants chercheurs et dans les attributions des bourses du MESR en provenance des Ecoles Doctorales, il fait des propositions en matière d'achat d'équipement mi-lourd d'intérêt général et mène une politique de développement de plates-formes techniques mutualisées internes au laboratoire.
- Sept membres : Directeur, trois responsables de site, trois responsables ou responsables adjoints de Département + quatre invités (1 ITA, 1 ACOMO, le chargé de communication, le chargé de mission sciences et société)
- Répartition des rôles entre Directeur et responsables de site :
  - Directeur : garant de l'esprit du laboratoire, responsable des relations stratégiques avec les tutelles, à l'interface entre le laboratoire et l'extérieur (notamment le CNRS), responsable communication
  - Responsables de site : gestion au quotidien des relations avec l'établissement de tutelle dont il dépend, en charge de l'organisation et de la vie quotidienne interne au site, en charge des relations du laboratoire avec l'enseignement de l'établissement dont il dépend. Chacun des trois responsables de site prend en charge une des trois missions suivantes : 1. coordination du Pôle Administratif et Financier d'Ampère, 2. coordination du Pôle Scientifique et Technique d'Ampère, 3. relations avec le collegium, I@L et le plan campus.
  - Autres missions du Directeur et des responsables de site, à répartir entre eux: relations industrielles, animation de la communauté des doctorants, relations sciences et société et séminaire scientifique, interdisciplinarité, évolution des carrières des ITA, ...
- Fréquence de réunion : bimensuelle

### Conseil scientifique du laboratoire

- Rôle : il définit les orientations stratégiques et scientifiques en matière de recherche
- Dix-sept membres : Directeur, trois responsables de site, trois responsables de département, trois responsables adjoints de département, sept responsables de groupe plus des personnalités invitées
- Fréquence de réunion : annuelle

### Conseil de laboratoire

Son rôle est statutaire et est défini dans le règlement intérieur et par le PV du Conseil de Laboratoire du 9/1/2003.

- Quinze membres : le directeur d'Unité, neuf membres élus (quatre représentants des chercheurs et enseignants-chercheurs, deux représentants des ITA et ITARF et trois représentants des doctorants) et cinq membres nommés
- Rôle: il se réunit au moins quatre fois par an et se prononce sur les affectations budgétaires, les demandes d'emploi, la politique scientifique du laboratoire et sur tout sujet dont le saisit le directeur. Il donne un avis sur les candidats à un emploi de chercheur ou d'enseignant-chercheur au Laboratoire Ampère
- Fréquence de réunion : mensuelle

## Groupes et départements

### Département

- Gouvernance : un responsable et un responsable adjoint (proposés suite à un vote des membres du Département, nommé par le Directeur d'Unité et par la tutelle correspondante)
- En charge de la coordination entre les groupes du Département, de l'animation scientifique transversale au niveau du Département.
- Donne un avis et classe les demandes faites par les groupes avant de les transmettre à la Direction du Laboratoire.

### Groupe

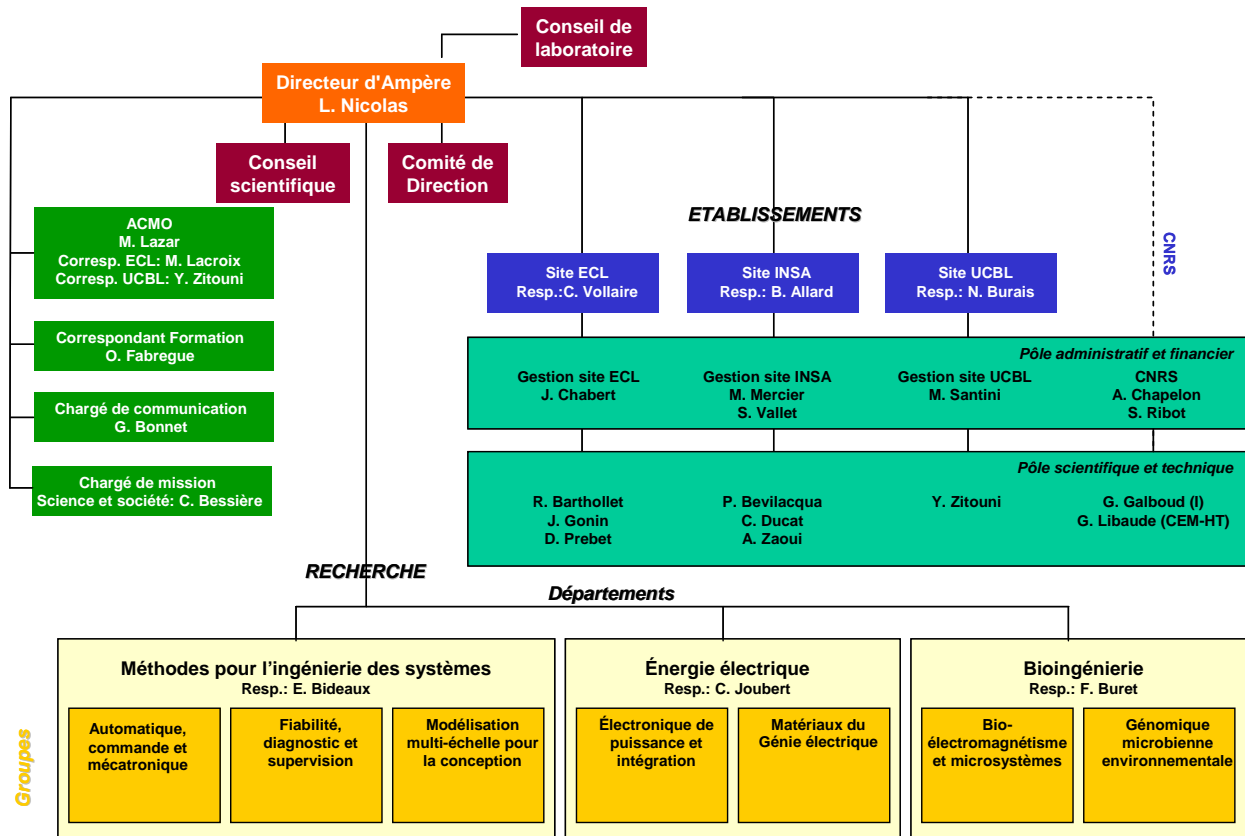
- Gouvernance : un responsable de groupe (désigné par les membres du groupe)
- En charge de l'animation scientifique disciplinaire et du quotidien du chercheur, à travers des réunions de groupe.
- Les groupes font remonter leurs demandes (doctorants, profils de recherche pour les postes, moyens spécifiques) au niveau du Département.

### Autonomie financière

Afin de financer leurs actions propres (réunions par exemple), les groupes et départements peuvent disposer d'un budget propre (ressources propres CNRS), laissés à la discrétion de leurs responsables. Le tableau suivant présente une répartition des moyens financiers qui pourrait être faite, sur la base de la dotation actuelle, en incluant le budget alloué aux responsables de site. Ce budget sera alloué annuellement par le Comité de Direction du laboratoire.

Origine	Moyens alloués	Entité Ampère	Répartition par entité	Total alloué
CNRS	75000 €	Département	3500 €	10500 €
		Groupe	2500 €	17500 €
		Direction	47000 €	47000 €
Ministère	146100 €	ECL	54100 €	54100 €
		INSA	68500 €	68500 €
		UCB	23500 €	23500 €

### Organigramme du laboratoire



## **Moyens mis en œuvre pour atteindre les objectifs affichés**

### **Rappel des objectifs :**

Les recherches menées au laboratoire Ampère ont pour objectif général l'ingénierie écologique et l'ingénierie des systèmes mécatroniques, en incluant leur efficacité énergétique et leurs interactions avec l'environnement.

- 2 priorités scientifiques, s'appuyant sur le développement d'un socle méthodologique fort lié à l'ingénierie des systèmes :
  - La bioingénierie
  - L'intégration de puissance
- 2 objectifs stratégiques :
  - Maintien de la dynamique actuelle, en termes de moyens humains et financiers, mais aussi en terme de recherches innovantes.
  - Consolidation et extension de l'inter- et de la pluri-disciplinarité

### **Politique d'animation de l'unité**

L'animation du Laboratoire se fera principalement à travers l'axe transversal « Sciences et société », dont l'objectif est de contribuer au développement et à la vie d'une identité intellectuelle commune et partagée (voir paragraphe correspondant).

D'autre part, le laboratoire, dans sa structure future, sera organisé en trois départements, avec des moyens d'animation spécifiques (voir paragraphe autonomie financière) pour mettre l'accent sur les priorités scientifiques.

### **Politique de formation**

Comme dans toutes les unités du CNRS, un plan de formation pour le laboratoire est établi chaque année par un correspondant de formation nommé par le Conseil de Laboratoire. Dans ce document les besoins en formation des personnels sont identifiés et recensés à partir des objectifs scientifiques du laboratoire et des plans de carrière des chercheurs ou techniciens. Un autre volet tente de mesurer la qualité des formations et le retour sur l'unité ou la personne.

L'analyse de ces 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. 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.

Pour le quadriennal 2011-2014, nous continuerons à maintenir cette politique incitative à la formation continue.

### **Politique de construction de partenariats**

Le laboratoire Ampère poursuit ses partenariats établis (institutionnels, industriels, académiques) et prête une attention particulière, par l'intermédiaire des ses chercheurs, à l'établissement de nouveaux partenariats. Les conventions de co-tutelle ou l'organisation de réunions de travail ciblées sont des jalons visibles de ces partenariats. L'implication dans les groupements de recherche montre le souci du laboratoire à participer à l'animation de réseaux, sources d'enrichissement scientifique, lieu de réflexion globale et de nature à rendre plus efficace la réponse à des appels d'offre.

### **Répartition des moyens**

La politique de répartition des moyens financiers est la suivante :

- Les groupes et départements seront dotés de moyens financiers, provenant de la subvention annuelle CNRS, pour assurer leur politique d'animation.
- Comme c'est déjà le cas actuellement, la subvention du ministère, répartie via les trois établissements ECL INSA et UCBL, sera utilisée par les responsables de site du laboratoire pour la gestion quotidienne de leur site.
- Il y a un prélèvement sur chaque contrat (20% des coûts de fonctionnement au maximum). Ce prélèvement est ensuite utilisé, suite à un appel à projets interne, pour financer des actions scientifiques amont ou des actions d'intérêt collectif, dans le cadre de la politique générale du

laboratoire. En régime permanent, le montant total ainsi réparti pourrait être de l'ordre de 500 k€ (voir partie correspondante du bilan 2007-2010).

- Enfin, les projets contractuels (principalement institutionnels), pour lesquels un contrôle strict des crédits affectés est effectué, restent sous la responsabilité de leur porteur ou du groupe auquel appartient leur porteur.

### **Politique d'investissement**

Les investissements en équipements, locaux, .., sont et seront financés de trois façons différentes, les priorités étant définies en Comité de Direction :

- s'ils font partie intégrante d'un projet, ils sont financés à travers le projet, après avoir obtenu l'aval du Conseil de Laboratoire
- s'il s'agit d'investissement d'intérêt collectif, ils sont financés à travers le prélèvement interne (voir paragraphe précédent)
- enfin, certains gros investissements font l'objet d'une demande directe auprès des établissements (demande de moyens annuels au CNRS par exemple).

### **Valorisation des travaux de recherche**

Le laboratoire est soucieux de l'intérêt de la valorisation des recherches. Au-delà des publications et des communications, première source de valorisation des travaux de recherche, le laboratoire est attentif aux manifestations mettant en valeur la recherche scientifique. Le site web est le premier outil de communication directe, que complète la participation à diverses manifestations et dissémination de résultats et d'idée (voir paragraphe « Diffusion de l'information »).

D'autre part, dans la droite ligne du quadriennal 2007-2010 (2 créations d'entreprise), Ampère continuera à favoriser le dissémination de ses travaux dans le monde industriel. Un effort particulier sur les brevets devra être fait.

### **Diffusion de l'information scientifique et technique**

Le laboratoire Ampère est totalement intégré à des établissements d'enseignement supérieur, avec 78% du personnel permanent qui relève de cette institution. Outre la production scientifique dans des revues ou lors de congrès, classique pour les laboratoires de recherche, Ampère participe à plusieurs types d'actions :

- Les centres d'essais, notamment CEM et Haute Tension, sont utilisés à des fins d'enseignement.
- Les outils logiciels développés à des fins de recherche sont souvent utilisés en bureau d'étude par les étudiants.
- Les enseignants du laboratoire proposent et encadrent des projets d'élèves, projets de recherche ou projets de fin d'étude au sein des établissements (ECL, INSA) : les étudiants sont amenés à travailler sur des sujets de recherche venant en support des activités des chercheurs
- Le laboratoire propose des actions de formation continue à distance à destination du monde industriel (notamment actuellement sur les techniques des dispositifs Haute Tension, la métrologie des décharges partielles, la compatibilité électromagnétique des systèmes de puissance).
- Enfin le laboratoire participe à la fête de la science, à des salons (Salon Européen de la Recherche et de l'Innovation par exemple), aux rencontres régionales de la recherche en région Rhône-Alpes.

Toutes ces actions seront poursuivies dans le futur.

### **Démarche qualité**

Une formation de « qualité dans la recherche » a été suivie par deux chercheurs et ingénieurs CNRS du laboratoire. A la suite de cette formation, l'équipe Modélisation a identifié certains dysfonctionnements. L'un des points essentiels nécessitant une action corrective est le manque de capitalisation des documents. Un outil informatique a été choisi pour tenter de remédier à ce problème. Cet outil est en cours d'adaptation aux spécificités du laboratoire. L'objectif pour le quadriennal 2011-2014 est de définir un plan d'action afin d'étendre cette politique qualité à l'ensemble du laboratoire basée sur l'expérience de cette équipe: Cette démarche est particulièrement importante pour la composante Microbiologie du Laboratoire, ainsi que pour les centres d'essais (CEM, Haute Tension) à des fins de sécurité, traçabilité, reproductibilité des expérimentations. Cette

démarche qualité, qui nécessite une participation active et une adhésion de tous les membres du laboratoire, fera l'objet d'une attention particulière de la part de la Direction du Laboratoire.

### **Indicateurs pour l'autoévaluation**

Compte-tenu de l'auto-analyse réalisée ci-dessus, de nos objectifs stratégiques et du mode d'évaluation actuelle des laboratoires, les indicateurs qui nous serviront à auto-évaluer « au fil de l'eau » l'activité du Laboratoire sont les suivants :

- Production scientifique (ACL, ACT), dont production impliquant plusieurs disciplines
- Budget total non consolidé, dont crédits à coloration pluridisciplinaire
- Dynamique : évolution des moyens humains, évolution des moyens financiers
- Nombre de doctorants et de post-doctorants
- Nombre de sujets innovants, dont ceux financés en interne, et montant des prélèvements internes
- Actions internationales
- Nombre de participants aux séminaires de l'axe transversal « Sciences et société »
- Indicateurs spécifiques pour la démarche qualité : nombre de documents capitalisés, facilité d'accès à des documents anciens, nombre de fiches de protocole éditées au cours du quadriennal.



**Département**

***"Méthodes pour l'ingénierie des systèmes"***

---

***Projet du département***

***Groupe "Modélisation multi-échelle pour la conception"***

***Groupe "Automatique, commande et mécatronique"***

***Groupe "Fiabilité, diagnostic et supervision"***

## Département "Méthodes pour l'ingénierie des systèmes"

**Objectif général** : développer des méthodologies d'analyse et de synthèse pour une conception maîtrisée intégrant les contraintes de commande, de fiabilité et de suivi pour des systèmes multi-physiques en relation avec leur environnement.

En d'autres termes, l'objet des recherches du département consiste en l'étude et la mise en œuvre de méthodes et d'outils d'aide à la conception de systèmes (des composants aux fonctions de contrôle-commande) en s'appuyant sur des méthodologies originales et en essayant d'adopter une démarche la plus cohérente et globale possible. Le département s'appuie sur des domaines applicatifs spécifiques (Fluid Power, CEM, actionneurs et systèmes de stockage électriques), ou des applications industrielles propres (transport terrestre, aéronautique et aérospatial, habitat, robotique médicale, ...). Ces travaux ont également une incidence sur les domaines applicatifs respectifs des 2 autres départements, à savoir "Energie électrique" et "Bioingénierie", et doivent constituer pour ceux-ci un centre de ressources méthodologiques.

**Mots-clés** : Automatique, Modélisation multi-physique et multi-échelle (temps et espace), Conception, Commande, Optimisation, Dimensionnement, Aide à la spécification, Efficacité énergétique, Sûreté de fonctionnement, Traitement des incertitudes, Robustesse, Analyse structurelle et comportementale.

### Structure et compétences du département

#### Liste des personnels

Nom	Prénom	Fonc.	Etab.	HDR	Groupes	Contribution scientifique
Bideaux	Eric	PU	INSA	x	MMC	Fluid Power, conception, Bond Graph, modèles inverses, systèmes multi-physiques
Blanco	Eric	MCF	ECL		ACM	Estimation robuste
Boutleux	Emmanuel	MCF	ECL		FDS	D : Reconnaissance de Formes, Intelligence artificielle
Brun	Xavier	MCF	INSA		ACM	Commande des systèmes Fluid Power
Clerc	Guy	PU	UCB	x	FDS	F, D : Reconnaissance de Formes, Actionneurs
di Loreto	Michaël	MCF	INSA		ACM	Analyse structurelle, systèmes de dimension infinie, commande
Dumitrescu	Emil	MCF	INSA		FDS	S : Approches formelles, vérification et synthèse de contrôleurs discrets
Ebérard	Damien	MCF	INSA		MMC	Systèmes multi-échelles, Analyse structurelle, Hamiltonien à port
Krähenbühl	Laurent	DR	ECL	x	MMC	Électromagnétisme, optimisation, conception
Lin-Shi	Xuefang	PU	INSA	x	ACM	Commande des systèmes en électronique de puissance
Marquis-Favre	Wilfrid	MCF	INSA	x	ACM	Conception, Bond Graph, modèles inverses, incertitudes, systèmes multicorps
Moreau	Richard	MCF	INSA		ACM	Conception et Commande de systèmes mécatroniques
Nicolas	Alain	PU	ECL	x	MMC	Électromagnétisme, CND
Niel	Eric	PU	INSA	x	FDS	F, S : Reconfiguration, propagation de fautes
Perrussel	Ronan	CR	ECL		MMC	Électromagnétisme, optimisation, incertitude, vivant
Pham	Minh-Tu	MCF	INSA		ACM	Robotique médicale, identification, estimation
Piétrac	Laurent	MCF	INSA		FDS	S : Approches formelles, vérification et synthèse de contrôleurs discrets
Razik	Hubert	PU	UCB	x	FDS	F, D : Modélisation physique, entraînements électriques

Redarce	Tanneguy	PU	INSA	x	ACM	Robotique, conception et commande de systèmes mécatroniques
Scorletti	Gérard	PU	ECL	x	ACM	Commande robuste et optimisation convexe
Sesmat	Sylvie	IR	INSA		ACM, MMC	Mise en œuvre des systèmes Fluid Power
Simon	Jean-Pierre	MCF	INSA		MMC	Incertitude, mécatronique
Smaoui	Mohamed	MCF	INSA		ACM	Commande et observation des systèmes Fluid Power
Thomasset	Daniel	PU	INSA	x	ACM	Analyse structurelle et commande des systèmes mécatroniques
Venet	Pascal	PU	UCB	x	FDS	F, D : Systèmes de stockage d'énergie et convertisseurs associés
Vollaire	Christian	PU	ECL	x	MMC	Electromagnétisme, CEM
Yahoui	Hamed	MCF	UCB	x	FDS	F, D : Modélisation physique, entraînements électriques

### Structure du département

Afin de couvrir la plus grande partie du cycle de conception d'un système (Figure 1), le département s'appuie sur 3 groupes de recherche centrés sur des disciplines bien identifiées dans la communauté scientifique de l'Institut ST2I du CNRS: les groupes "Modélisation multi-échelle pour la conception (MMC)", "Automatique, commande et mécatronique (ACM)", et "Fiabilité, diagnostic et supervision (FDS)".

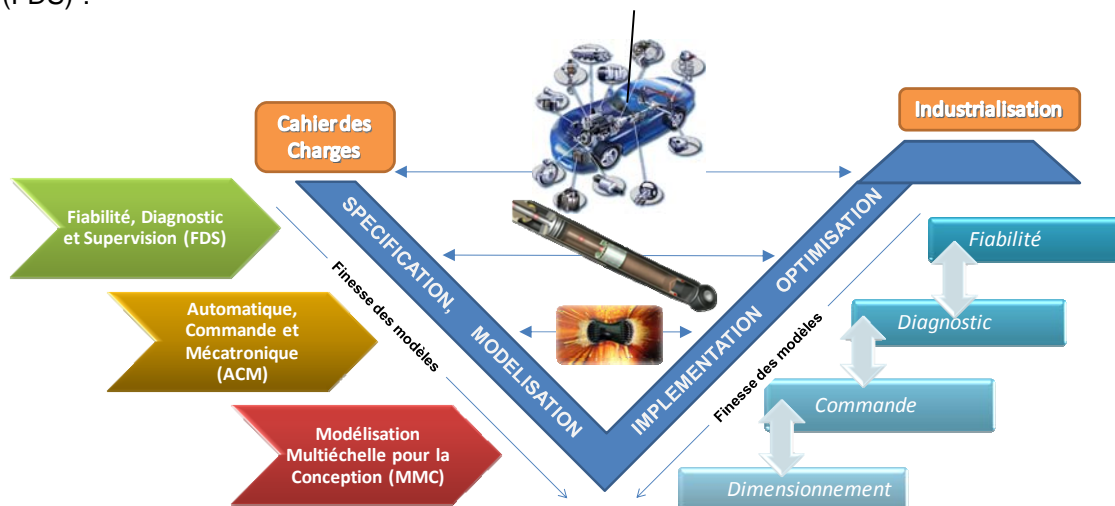


Figure 1 : Démarche de conception des systèmes multi-physiques et structuration du département

La structure de département est fédératrice et permet grâce aux compétences transversales de ses membres de développer des travaux de recherche aux interfaces de thématiques transdisciplinaires. Les groupes, quant à eux, rassemblent les membres du département autour de champs disciplinaires fondamentaux. Ils garantissent un environnement favorable, en apportant expertise et reconnaissance scientifique, pour contribuer à l'avancée de la recherche dans leurs disciplines respectives.

### Compétences du département

Malgré sa vocation méthodologique, le département rassemble des compétences aussi bien théoriques qu'appliquées, puisque la conception de systèmes ne peut s'entendre sans le point de vue pragmatique des technologies. Trois sections du CNU (60e, 61e et 63e sections), au cœur du département ST2I du CNRS, sont représentées, et les domaines technologiques maîtrisés couvrent un large champ d'applications: électromagnétisme, électromécanique, électrohydraulique, électropneumatique, ....

Ces compétences sont réparties au niveau des 3 groupes et le poids important des disciplines issues de l'Automatique s'explique par notre volonté de mettre l'approche "système" au centre des

problématiques abordées dans le département.

- Le groupe "Modélisation multi-échelle pour la conception" (MMC) rassemble les compétences autour des problématiques de simulation et de prototypage virtuel, de l'aide au dimensionnement des architectures de transmission de puissance, et des méthodes d'optimisation paramétriques.
- Le groupe "Automatique, commande et mécatronique" (ACM) concentre le savoir-faire en termes de synthèse de commande et de capteurs logiciels avec des approches linéaires et non-linéaires, de robustesse des modèles incertains et d'analyse des propriétés structurelles pour la commande.
- Le groupe "Fiabilité, diagnostic et supervision" (FDS), quant à lui, regroupe les compétences dans les domaines de l'analyse de la physique des défaillances, le traitement de l'information et la reconnaissance de formes, l'automatique des systèmes à événements discrets et la synthèse de contrôle par supervision.

## Perspectives de recherche

### Contexte

L'ingénierie des systèmes constitue le contexte scientifique des travaux de recherche développés au sein du département. 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, ou encore de l'accroissement des fonctionnalités. La conception nécessite donc d'une part le développement de méthodologies originales à la frontière de la modélisation, de la commande, de la sûreté de fonctionnement et des réalisations technologiques, car seule une recherche transdisciplinaire fortement interactive permet de répondre à ces nouvelles exigences.

### Objectif

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

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 et des contraintes environnementales 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 de conception des systèmes avec une approche intégrée, les méthodes, modèles et outils développés doivent donc s'adresser spécifiquement aux démarches d'analyse et de diagnostic, de synthèse fonctionnelle et comportementale, de dimensionnement et d'optimisation.

Pour répondre à cette problématique, chacun des groupes aura en charge de développer un ou plusieurs aspects de la démarche de conception (une description plus détaillée de ces problématiques spécifiques est donnée dans le projet de chacun des groupes):

- Le groupe "Modélisation multi-échelle pour la conception" s'attachera à développer méthodes et outils numériques pour l'aide à l'analyse des performances, la conception et l'optimisation des systèmes pluridisciplinaires de transmission de puissance en tenant compte des contraintes d'incertitude, d'échelle de temps ou d'espace et de temps de calcul.
- Le groupe "Automatique, commande et mécatronique" contribuera au développement d'outils méthodologiques pour l'analyse et la commande de systèmes dynamiques complexes, le transfert et l'adaptation aux systèmes mécatroniques.
- Le groupe "Fiabilité, diagnostic et supervision" aura pour objectif de maîtriser la Sûreté de Fonctionnement des composants et des systèmes au travers des indicateurs de sûreté et des moyens assurant le fonctionnement.

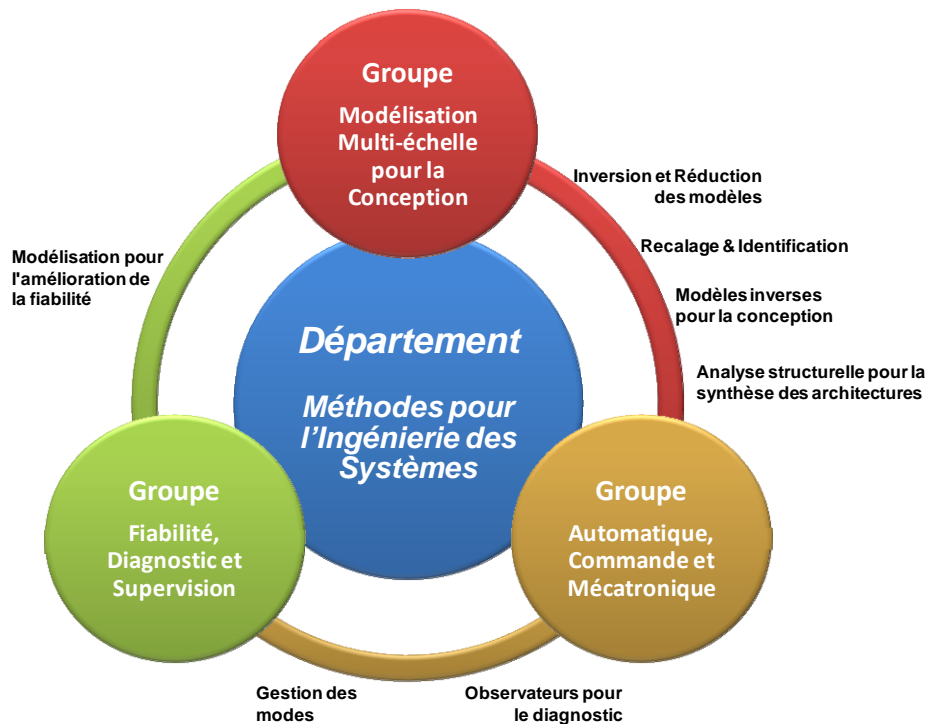


Figure 2: Projets fédérateurs du département

### Défis relevés et verrous adressés

Aux interfaces entre les groupes seront abordées plusieurs problématiques interdisciplinaires (Figure 2) qui apparaissent au cours de la démarche de conception et qui constituent bien souvent des difficultés majeures d'un point de vue théorique :

- **Observateurs pour le diagnostic:** pour cette problématique à l'interface entre les groupes ACM et FDS s'intéressera à la mise en œuvre des techniques issues de l'automatique continue dans le cadre du suivi des modes de fonctionnement que le système soit de nature continue ou discrète. En particulier seront traités les problèmes liés au nombre et à la qualité des capteurs, la robustesse vis-à-vis des paramètres des modèles du système et des bruits (d'entrée et de mesure).
- **Gestion des modes :** également à l'interface entre les groupes ACM et FDS, ce travail se propose d'étudier ici 2 cas particuliers de la gestion des modes : la reconfiguration sur fautes et l'optimisation de la gestion de l'énergie. La première s'intéressera à une gestion événementielle de la configuration d'une architecture en basant la recherche de lois de commande et de commutation sur des propriétés de stabilité et d'optimisation (coût). Dans la seconde, la gestion des modes sera envisagée sous l'angle du réglage dynamique des facteurs sensibles de la consommation d'énergie comme la complexité des lois de commande et les conditions de fonctionnement (fréquence de travail, tension d'alimentation, charge...) et de la supervision de la consommation (mise hors tension et réveil de certains dispositifs).
- **Modélisation pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes :** ce travail à l'interface entre les groupes FDS et MMC consiste au développement de modèles multi-physiques permettant de suivre et d'analyser les défauts et le vieillissement des composants. La prise en compte dans ces modèles des contraintes internes et externes de types électrique, électrochimique, thermique et mécanique permet de rétroagir sur la conception en fonction du cycle de vie recherché.
- **Recalage et Identification:** ce projet entre les groupes MMC et ACM s'intéresse aux méthodes permettant la détermination, à partir des résultats expérimentaux, des paramètres de modèles dotés d'intervalles d'incertitude. Les méthodes utilisées dans les domaines de la conception et de la commande étant différentes, étudier un ensemble plus intégré de techniques conjuguant les avantages de ces deux approches afin de repousser leurs limitations semble crédible. Les enjeux importants sont liés aux dynamiques fortement non linéaires des systèmes traités (fluid power, robotique, etc..), la pertinence des propriétés du

système exhibées par son modèle ainsi que la gestion des intervalles d'incertitude. Ces deux derniers enjeux recourent ceux de la réduction de la complexité des modèles, ce qui constitue une ouverture.

- **Modèles inverses pour la conception** : cette activité de recherche à l'interface entre les groupes MMC et ACM s'appuie sur l'approche entrée/sortie et la modélisation des systèmes dynamiques. Ces travaux méthodologiques appliqués en conception vise à limiter voire à éviter le procédé itératif d'analyse - erreur - correction. Elle repose sur une approche système en conception, considérant un système dynamique comme un ensemble de sous-systèmes ou composants interagissant les uns avec les autres, chaque composant possédant lui-même une dynamique propre, des entrées d'excitation et des sorties. A partir de la connaissance des spécifications des sorties d'un système issues d'un cahier des charges donné, il s'agit, par le biais de techniques d'inversion, de déterminer les entrées du système, à savoir les composants internes (dimensionnement) et/ou les entrées d'excitation (structure de commande). Ces recherches sont illustrées au travers du dimensionnement de systèmes mécatroniques, tolérants vis-à-vis d'incertitudes.
- **Analyse structurelle pour la synthèse des architectures**: à l'interface des groupes MMC et ACM, cette activité de recherche vise à élaborer une méthodologie pour l'analyse et la structuration des propriétés d'un système dynamique, en accord avec les spécifications fonctionnelles et dynamiques requises pour une gestion d'énergie optimisée. Cette activité aborde donc globalement trois problèmes. Le premier concerne la définition des variables caractéristiques liées au domaine et à l'environnement du système considéré, ainsi qu'à l'étude de leurs couplages respectifs. Puis vient l'analyse de l'adéquation entre la structure d'actionnement et de mesure du système (multi-actionneurs, multi-capteurs, réseaux distribués, ...) et les spécifications fonctionnelles et dynamiques requises. Enfin, le dernier problème concerne l'élaboration de structures de commandes multivariables permettant d'atteindre et de respecter les spécifications dynamiques souhaitées. Ces problèmes sont en réalité fortement couplés en raison de leur dépendance par rapport au modèle d'analyse.
- **Conception, modélisation et commande des systèmes du Fluid Power**: à l'interface des groupes MMC et ACM, cette activité constitue l'une des niches technologiques du laboratoire qui s'appuie sur la double compétence du département en termes de commande et de modélisation. Ces travaux de recherche cherchent à mettre à profit les spécificités des caractéristiques physiques des dispositifs à fluide sous pression (air ou liquide) pour des applications dans lesquels cette forme d'énergie est incontournable ou s'avère intéressante pour atteindre les performances requises. En raison de la complexité des phénomènes, l'association des techniques de modélisation aux approches "modernes" de commande, issues de la partie plus théorique de la communauté automatique mondiale, a permis et doit encore conduire à des développements originaux ou en rupture dans les domaines du médical, de la réalité virtuelle, de l'aérospatiale, de l'hybridation dans le transport. La problématique de l'efficacité énergétique est au cœur de cette activité.

### **Pertinence et positionnement par rapport aux autres laboratoires nationaux, voire internationaux**

Dans le domaine de l'ingénierie des systèmes, la croissance de l'utilisation de l'énergie électrique et de l'informatique embarquée, 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 et à une prise en compte au plus tôt des différentes contraintes, l'association de différentes technologies et le développement de méthodologies maîtrisées peuvent conduire à des gains de performance significatifs, en permettant d'exploiter au mieux les spécificités et les avantages de chacune d'elles. Le département semble donc particulièrement bien structuré pour conduire une réflexion pertinente dans ce contexte.

Il se caractérise par un domaine de compétences très original dans le paysage national et international 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: maîtrise de toute la chaîne de transmission de puissance (électrique, hydraulique, pneumatique, mécanique, thermique),
- de la reconnaissance nationale et internationale de son expertise au niveau de certaines disciplines, méthodes, approches, ou encore niches technologiques,
- de ses thématiques de recherche, pour certaines très originales, qui s'appuient sur une continuité entre théorie et expérimentation en passant par les aspects logiciels et les applications.

### Dimensions sociétales des perspectives

Les méthodes constituent bien souvent les parties non visibles des innovations, même si elles construisent pas à pas les briques permettant de faire aboutir la réalisation de nouveaux dispositifs qui modifient ou font rêver notre société. Dans notre système économique, les développements méthodologiques, et des outils associés, constituent la clé de voûte de la compétitivité industrielle. C'est aussi un enjeu pour l'accroissement l'enrichissement des savoirs, la transmission des connaissances, le confort des individus, ...

Du point de vue de leurs dimensions sociétales, nos travaux, théoriques et appliqués, sont en liens avec les grands enjeux de la société:

- l'efficacité énergétique et l'éco-conception pour les aspects écologiques,
- le confort, l'assistance à la personne, l'aide à l'apprentissage pour la dimension humaine,
- l'efficacité et la compétitivité en ce qui concerne les ingénieurs et l'industrie.

Plusieurs projets phares et innovants viendront appuyer et illustrer nos apports dans chacun des points précédents :

- pour le premier, la transmission d'énergie sans fil et l'hybridation dans le transport,
- pour le second, l'aide au geste (médical ou des personnes à mobilités réduites), la gestion de l'énergie dans l'habitat, la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans le vivant,
- pour le dernier, le dimensionnement et la conception de systèmes sûrs et fiables.

### Collaborations envisagées

#### Dans le laboratoire :

En interne, le département devra constituer un socle méthodologique pour les 2 autres départements en termes d'outils et de méthodes. Il existe d'ores et déjà plusieurs projets communs et d'autres projets doivent naître aux interfaces. Parmi les collaborations existant depuis plusieurs années, on peut citer :

- avec le département Bioingénierie : la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les systèmes vivants,
- avec le département Énergie électrique : la CEM et la commande des convertisseurs d'énergie électrique, la gestion de l'énergie dans l'habitat et les systèmes embarqués, et la fiabilité des convertisseurs statiques d'énergie électrique.

Plusieurs projets ambitieux doivent également émerger au cours du prochain quadriennal, en particulier en lien avec le département "Bioingénierie":

- Un premier travail concernera la classification des entités biologiques. Nous recherchons ici la validation, en tant que méthodes génériques, des approches utilisées pour le diagnostic des systèmes physiques et initialement développées pour le suivi d'état du fonctionnement d'actionneurs électromécaniques. Il s'agira de tester leur applicabilité à l'étude de systèmes biologiques, et ainsi développer de nouvelles démarches analytiques en biologie, en particulier dans le contexte biologique d'évolution moléculaire et de l'analyse des stratégies d'utilisation des codons synonymes. Inversement, par la confrontation avec les méthodes bioinformatiques employées pour l'analyse des données moléculaires, nous explorerons de nouvelles voies d'amélioration des méthodes de classification utilisées pour le diagnostic.
- Un second projet s'intéressera à la modélisation et l'identification des comportements dynamiques des systèmes biologiques. En effet, la Biologie des systèmes est une approche visant à comprendre les règles fondamentales qui gouvernent le fonctionnement des systèmes biologiques à travers la description quantitative des composants du système et de leurs interactions. L'émergence de la modélisation et de l'analyse mathématique des systèmes (Sciences de l'Ingénieur, Traitement du Signal et Automatique) permet d'ouvrir un vaste champ d'investigation dans ce domaine du vivant et offre un cadre conceptuel et méthodologique particulièrement attractif pour le développement de collaborations

## Avec les partenaires industriels et académiques :

Pour les aspects applicatifs et la confrontation des méthodes développées à des problèmes concrets, le département s'appuiera naturellement sur ses partenaires industriels : eDF, IFP, CNES, CEA, Airbus, Safran, Hispano, PSA Peugeot Citroën, Renault, Volvo Trucks, Irisbus, POAE, Bombardier, Bosch-Rexroth, ...

Il participera aux activités scientifiques dans le cadre de plusieurs structures ou organismes nationaux et internationaux.

- au niveau national, le département devra avoir un rôle actif dans 3 GDR : SEEDS, MACS et STIC-Santé, et s'impliquer dans des organisations industrielles comme le pôle de compétitivité "Lyon Urban Trucks and Bus 2015", la SIA, la SEE, ou encore la NAFEMS.
- au niveau international, il existe déjà des collaborations entretenues au travers du LIA Maxwell et du réseau Fluid Power Centres in Europe (FPCE), et des relations plus ponctuelles avec des universités étrangères. Ces échanges doivent être étendus par le biais de projets européens et de relations privilégiées établies par des membres du département.

## Moyens d'essai

Même si nos activités sont principalement théoriques ou numériques, elles se font pour partie en interaction étroite avec 5 plates-formes expérimentales ou centres d'essais répartis sur les différents sites ECL, INSA, UCBL :

- [Centre d'essais CEM](#) (site ECL) : 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).
- [Centre d'essai Fluid Power](#) (site INSA) : unique dans le monde universitaire français, ce centre d'essai (150 m<sup>2</sup>) est constitué de bancs électropneumatiques et électrohydrauliques. Son développement ces dernières années est issue en majeure partie de fonds propres liés aux activités du laboratoire Ampère dans le domaine du Fluid Power. **L'importance prise par ce centre nécessite à ce jour la présence à temps plein d'un responsable qui aura pour mission de veiller à son utilisation et son développement : veille scientifique et technologique, formation, conception, sécurité, maintenance achat...**
- [Centre de caractérisation et de fiabilité des systèmes de stockage d'énergie](#) (site UCBL) : condensateurs, supercondensateurs, batteries. 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.
- 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.
- Plate-forme Convertisseur de Puissance (site INSA) : composée de bancs moteurs (synchrone, asynchrone, à courant continu), elle est utilisée pour tester les nouveaux algorithmes de commandes et d'observation développés et intégrés sur carte de prototypage rapide (matériel dSpace) ou sur composants spécifiques (ASIC, FPGA). Des cartes spécifiques ont été développées au laboratoire pour gérer les commutations semi-douces, détecter le signe du courant; intégrer des drivers pour composants d'onduleur, effectuer l'interface entre dSpace et les drivers, intégrer un onduleur matriciel.
- [Plate-forme diagnostic 45 kW](#) pour les systèmes électriques (site 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.

## **Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet**

Nos recherches se basant sur la continuité entre la théorie et l'expérimentation d'une part et le développement des outils et des applications d'autre part, les travaux s'appuieront naturellement sur :

- les moyens d'essai du laboratoire,
- les collaborations internes ou avec d'autres laboratoires, dans le cadre de groupes de travail et de projets institutionnels.

La synergie et l'efficacité au sein du département sera soutenu par :

- un cycle régulier de séminaires scientifiques et de formation s'adressant aux doctorants et aux chercheurs : présentations internes ou de personnalités extérieures au laboratoire, formations aux outils, ...
- une démarche qualité en termes de capitalisation du savoir-faire et des connaissances : capitalisation des méthodes, modèles et résultats de recherche, de la bibliographie, ...

Enfin, pour favoriser l'émergence de la transversalité, outre les projets impliquant les chercheurs aux interfaces des groupes de recherche, il faudra créer une dynamique interne au département, par exemple en définissant un projet fédérateur. Celui-ci pourrait reposer sur le développement d'une plateforme commune d'aide à la conception regroupant outils et méthodes, capitalisant les savoirs et s'appuyant sur des langages suffisamment ouverts comme Modelica ou SCICOS et des logiciels spécialisés; l'objectif à long terme étant de proposer une continuité dans la démarche de conception (du composant au système piloté) en assurant la cohérence des modèles et des spécifications utilisés.

En termes de ressources, puisque le département s'appuie sur des expertises solides et reconnues, il se doit de les pérenniser et de garantir leur développement. C'est le cas de la modélisation des phénomènes électromagnétiques, du Fluid Power, de la fiabilité des systèmes de stockage électrique, de l'inversion des modèles pour la conception. Pour celles-ci, le support d'ingénieurs de recherche pour le suivi des relations avec les industriels (Fluid Power, stockage électrique) ou de chargés de recherche pour concrétiser au plus vite les idées est un facteur déterminant. C'est l'un des premiers objectifs du département en termes de recrutement.

D'autre part, dans le groupe MMC, le déséquilibre entre PU et MCF doit être rapidement compensé par le recrutement de sources vives.

Le groupe FDS, nouveau regroupement de chercheurs au sein d'Ampère, doit pour assurer sa cohérence recruter un chercheur permettant de faire l'interface entre les méthodes de diagnostic/pronostic et les techniques de supervision et de reconfigurations des systèmes

Enfin, pour favoriser la reconnaissance des travaux du laboratoire dans le domaine de l'Automatique, une plus forte implication dans les sections 07 du CNRS et 61 du CNU sont à mettre en œuvre au cours de ce quadriennal. La lisibilité de cette discipline sur Lyon en dépend directement

## **Mot du (des) responsable(s)**

Le département "Méthodes pour l'ingénierie des systèmes" rassemble une partie importante des forces du laboratoire Ampère. Fort des expertises et des différentes compétences qu'il regroupe, le département affiche une transdisciplinarité très originale et prometteuse pour aborder dans leur globalité les problèmes de conception des systèmes.

Cette diversité peut très clairement s'avérer une faiblesse et un facteur de morcellement des groupes et du département. Toutefois, comme cette présentation a essayé de le souligner, les projets transversaux qui, pour beaucoup, ont une réalité aujourd'hui, sont motivant intellectuellement et doivent permettre d'assurer la cohérence.

En permettant d'aborder presque toutes les aspects scientifiques d'un projet dans le domaine de la transmission de puissance, on peut aussi espérer qu'une telle structure aura un impact positif sur nos relations industrielles et permettra de relever quelques défis scientifiques qui conduiront naturellement les membres du département à se retrouver autour de projets ambitieux et fédérateurs.

## Groupe " Modélisation multi-échelle pour la conception "

**Objectif général :** développer des méthodes et outils numériques pour l'aide à l'analyse des performances, la conception et l'optimisation des systèmes pluridisciplinaires de transmission de puissance en tenant en compte des contraintes d'incertitude, d'échelle de temps ou d'espace et de temps de calcul.

**Mots-clef :** modélisation multi-physique et multi-échelle, éléments finis, optimisation paramétrique, couplage modèles 0D/3D, approche conservative en énergie, Bond Graph, modèles inverses, Fluid Power, électromagnétisme, .....

### Structure et compétences du groupe

#### Structure du groupe

La maîtrise du comportement des systèmes complexes s'accompagne du développement d'outils pour les phases de conception et de modélisation, de méthodes de synthèses pour la conduite et de techniques de résolution. La finalité est de répondre à des questions théoriques fondamentales et de guider les applications d'ingénierie dans des domaines pluridisciplinaires.

Autour de cette problématique, trois axes de recherche sont développés dans notre groupe afin de répondre à certains aspects de ce vaste objectif:

- Le premier, **modélisation des couplages multi-physiques et multi-échelles**, s'intéresse au couplage de la modélisation des phénomènes locaux et leurs interactions avec la phénoménologie macroscopique.
- Le second, **inversion et réduction de modèles**, porte sur le développement de nouvelles méthodes pour l'inversion et la réduction de modèles multi-physique et multi-échelles, qu'ils soient linéaires ou non linéaires.
- Un dernier axe, **optimisation pour la conception des systèmes**, vise l'étude de méthodes permettant d'aborder les problèmes d'optimisation multi-objectifs et multicritères pour traiter le compromis coût-énergie-performance qui intervient lors de la conception et de la gestion de l'énergie.

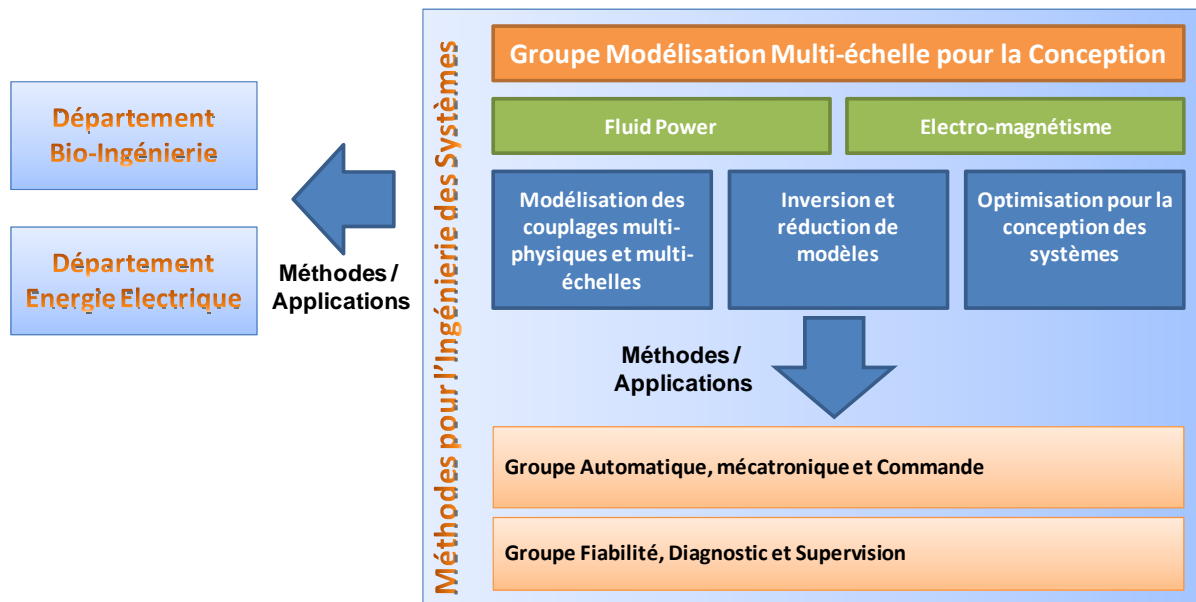


Figure 1: Structuration du groupe "Modélisation pour la conception des systèmes"

#### Compétences du groupe

Les compétences des membres du groupe "Modélisation multi-échelle pour la conception" sont essentiellement tournées vers des aspects méthodologiques et numériques mais il existe (et nous

tenons à entretenir) des interactions fortes avec des domaines applicatifs qui alimentent nos problématiques:

- les machines électriques, systèmes de stockage et convertisseurs de puissance,
- la microbiologie (cellule) et le vivant,
- la fluidique (ou Fluid Power).

Une part importante de l'activité sera tournée vers des activités « génériques » liées à la modélisation numérique des phénomènes locaux et macroscopiques: électromagnétisme, mécanique des fluides, mécanique multicorps, thermodynamique, thermique, électrochimie, ...

Ces recherches génériques concernent des méthodes de conception de dispositifs pour lesquels la phénoménologie locale ou les aspects multi-physiques jouent des rôles déterminants. L'amélioration des modèles utilisés dans ces calculs permet alors des applications concrètes sur quelques familles de problèmes en incluant les aspects expérimentaux correspondants:

- éléments finis, paramétrisation des équations aux dérivées partielles, incertitudes,
- réduction de modèle, homogénéisation,
- analyse structurelle,
- inversion des modèles,
- identification de paramètre ou recalage de modèle,
- optimisation et aide au dimensionnement,
- approche multi-grille, décomposition de domaine, méthode de perturbations,
- approche conservatives en énergie, Bond Graph.

## Perspectives de recherche

### Contexte

À l'heure actuelle, une exploitation rationnelle de l'énergie s'avère cruciale dans la conception et le développement de nouveaux systèmes, c'est aussi un facteur essentiel de la compétitivité industrielle. A fortiori, les outils de mise en œuvre, tels la modélisation, la commande et la simulation, se doivent de répondre à cette attente et d'évoluer en ce sens. De cette nécessité d'évolution émergent des problèmes théoriques qui demandent une abstraction par rapport aux systèmes physiques. Une meilleure exploitation de l'énergie requiert en effet une amélioration des couplages multi-physiques et multi-échelles, de nouveaux développements pour la conduite de systèmes et une capacité de mise en œuvre numérique. Ainsi une expertise pointue des systèmes complexes s'avère nécessaire.

### Objectifs

Notre volonté, au sein de ce nouveau groupe, est de croiser nos différentes approches en termes de modélisation et de conception, issues d'une représentation localisée des comportements pour l'une, et de l'analyse de la phénoménologie à un niveau macroscopique pour l'autre. Autour de cette problématique, nous avons dégagé 3 axes de recherche correspondant à des typologies de problèmes différents.

#### Axe 1: Modélisation des couplages multi-physiques et multi-échelles

Traditionnellement, la phase de modélisation est conditionnée par l'environnement des applications auquel le modèle est destiné. En d'autres termes, il n'est pas rare d'aboutir à des modèles qui sont rigoureux d'un point de vue des mécanismes physiques mis en jeu, mais inadaptés pour d'autres typologies de problème comme l'analyse structurelle, la synthèse de lois de commande, ... ou très lourd en temps de calcul.

*A contrario*, dans d'autres disciplines comme l'automatique, une représentation standardisée pour la modélisation consiste en une idéalisation du système réel. Ainsi, en s'éloignant de la phénoménologie physique, les phénomènes négligés sont non contrôlés et des conditions limites, qui ont une réalité physique et pratique, ne peuvent être traitées.

La formulation de la dynamique des systèmes complexes repose donc sur une représentation précise de phénomènes couplés faisant intervenir des quantités sensibles à différentes échelles de temps et d'espace. La complexité dans la réalisation du modèle global réside alors dans "l'assemblage" des sous-modèles : il convient d'être en mesure de représenter les couplages entre différents domaines physiques, ainsi que d'être à même d'inclure des phénomènes locaux dans le modèle macroscopique. La finalité est une analyse comportementale basée sur une représentation physique, énergétique par exemple, des équations régissant la dynamique de ces systèmes.

La complexité de ces problèmes se retrouve dans les 2 domaines que nous aborderons (électromagnétisme et Fluid Power) dans le contexte de 2 actions internes à notre groupe:

- Couplage des approches locales et macroscopiques des systèmes fluidiques,
  - Modélisation numérique pour l'électromagnétisme,
- et de 2 actions en collaboration avec le groupe "Bioélectromagnétisme et microsystèmes" du département "Bioingénierie" et le groupe "Matériaux"
- Champ et santé, bioélectromagnétisme.
  - Compatibilité électromagnétique.

### Axe 2: Inversion et réduction de modèles

À l'aval des problématiques précédentes, dès lors qu'un modèle rigoureux est établi, se posent des questions d'inversion et de réduction de modèle. La prise en compte des hétérogénéités introduit de fortes non linéarités qui complexifient l'analyse des propriétés structurelles du système et l'exploitation du modèle pour des problèmes d'identification et de recalage. Des modèles plus adaptés peuvent être construits à partir de calculs d'équivalence réalisés à l'échelle inférieure (démarche analytique), ou directement à partir de mesures "macroscopiques" judicieusement choisies (démarche phénoménologique). De plus, il existe souvent des invariances géométriques qui permettent de simplifier les modèles numériques.

D'autre part, la démarche d'inversion est capitale dans la phase de conception de systèmes ou de composants d'un système. Dans la pratique, une stratégie de surdimensionnement est adoptée de façon récurrente pour palier les lacunes des modèles macroscopiques simplifiés qui sont utilisés dans cette démarche. Là aussi, il existe un besoin en termes de méthodes permettant de réduire la complexité des modèles tout en tenant compte de la réelle nature des phénomènes physiques. Des objectifs de développement et d'exploitation de nouvelles méthodes issues de l'automatique sont à envisager.

Ces travaux de recherche seront réalisés autour de 2 projets, le premier interne au département sera conduit avec le groupe "Automatique, commande et mécatronique", le second en collaboration avec le groupe "Matériaux du génie électrique" du département "Énergie électrique":

- Inversion et réduction des modèles de systèmes multi-échelles:
- Méthodes de caractérisation et d'homogénéisation.

### Axe 3: Optimisation pour la conception des systèmes

L'innovation est aujourd'hui intimement liée au triptyque coût-énergie-performance. Avec les avancées des technologies actuelles, ceci conduit à une multiplicité de critères de conception et de solutions envisageables. La méthode consistant à optimiser un élément du système sans tenir compte de la globalité du problème ne garantit en rien l'obtention d'une solution pertinente. La recherche d'une "bonne solution" doit passer par une approche globale de l'optimisation. Dans cet objectif, la modélisation multi-échelle se révèle particulièrement bien adaptée car elle rend compte des interactions internes au système.

Nous aborderons ces travaux de recherche au travers de 2 actions, la première développant les aspects méthodologiques et les outils, la seconde à vocation plus appliquée. Ces 2 actions seront conduites en lien avec le groupe "Automatique, commande et mécatronique" du département.

- Optimisation et problèmes inverses pour la conception,
- Actionneurs et systèmes de transmission de puissance.

### Perspectives, défis relevés ou les verrous adressés

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 (c'est-à-dire un problème inverse) plus que celui de la seule analyse (problème direct).

### Axe 1: Modélisation des couplages multi-physiques et multi-échelles

**Compatibilité électromagnétique:** La cohabitation des différents organes de puissance et de commande d'un dispositif complexe est toujours difficile du point de vue de la Compatibilité Electro-Magnétique (CEM). On constate en effet que le strict respect du cahier des charges CEM pour chaque organe pris individuellement n'est pas une garantie contre les dysfonctionnements du système complet. Classiquement, on apporte a posteriori quelques corrections au système « mal conçu » pour corriger ses plus gros défauts de CEM.

Notre but est, au contraire, d'essayer de tenir compte de la CEM « système » dès le début de la conception. Ce système sera par exemple un avion complet, ou une salle de soins intensifs d'hôpital, avec prise en compte des positions respectives de tous les sous-systèmes électriques ou électroniques. Il faut pour cela disposer de modèles tridimensionnels rapides pour quantifier les interactions entre les champs électromagnétiques rayonnés par/dans ces différents sous-systèmes.

Des difficultés semblables existent pour les perturbations conduites, pour lesquelles il faut alors tenir compte de la géométrie des différents câblages et plans de masse. Ces calculs doivent être réalisés en couplage avec les méthodes de calcul de réseaux de câbles et de circuits électriques (plate-forme logicielle).

Nous nous intéresserons particulièrement à la quantification par la mesure des champs électromagnétiques rayonnés par des organes de différents systèmes électriques et électroniques, afin d'en déduire des modèles équivalents simplifiés, ré-utilisables dans des simulations 3D globales. Les applications visées concernent typiquement les transports (terrestres, navals, et aériens), et certains systèmes hospitaliers, où les problèmes de CEM peuvent être vitaux, au sens propre.

**Couplage des approches locales et macroscopiques des systèmes fluidiques:** Afin de disposer d'outils pour l'étude des systèmes complexes, le développement de logiciels couplant de manière efficace les approches locales et macroscopiques demeure actuellement un enjeu important aussi bien dans les phases de conception que d'analyse. Par exemple, au cours du cycle de conception d'un véhicule, la prise en compte des phénomènes associés à des écoulements de fluides a pris une importance majeure sous l'effet de contraintes d'économie énergétique (aérodynamique, motorisation), de confort (bruit, climatisation) et de sécurité (freinage).

Néanmoins, toutes les physiques ne sont pas égales devant les lois de la simulation numérique. Aujourd'hui la simulation des écoulements requiert des temps de calcul qui sont de loin très supérieurs à ceux constatés dans d'autres domaines physiques avec lesquels ont lieu des interactions. Ces disproportions conduisent naturellement vers la sectorisation des problèmes et la résolution de ceux-ci de façon non coordonnée. Elles excluent l'emploi de techniques d'optimisation performantes souvent utilisées dans d'autres disciplines. Dans la mise en œuvre numérique, le challenge se situe au niveau du compromis temps de calcul - précision désirée. Il apparaît évident que le nombre d'éléments d'un maillage et le temps d'utilisation machine sont corrélés. Cette corrélation est d'autant plus pénalisante que le modèle est fin et que les dynamiques intervenant sont couplés à des échelles d'espace et de temps distinctes.

Il existe ici un verrou qui ne peut être levé que par une réduction adaptée du modèle et un choix des éléments de discrétisation. Actuellement, ces choix résultent d'une expertise sur le système mais ils se doivent d'être assistés pour permettre une diffusion plus large vers une communauté interdisciplinaire comme l'automatique.

**Modélisation numérique pour l'électromagnétisme:** La connaissance précise et localisée des grandeurs électromagnétiques (champs, courants, densité d'absorption spécifique 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).

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.

- travail direct sur la « grosse » matrice obtenue : méthodes multigrilles,
- décomposition en sous-problèmes de tailles réduites : décomposition de domaines, méthodes multi-échelle, méthode des (grosses) perturbations, réduction de dimensions (résultat 3D comme combinaison de résultats 1D/2D/axi avec un problème 3D de petite taille),
- coordination de l'utilisation de plusieurs méthodes numériques (FEM, BEM, Moments, ...) ; décomposition système (par exemple par passage partiel ou total à une méthode de réductances ou de réseaux électriques)

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 aborderons aussi la prise en compte de ces incertitudes, en caractérisant l'incertitude résultante sur les résultats des calculs (travaux sur la variabilité par des méthodes stochastiques, ou d'autres approches tendant au même but).

Ces calculs ne sont possibles que s'il existe les maillages adaptés. Si dans beaucoup de situations les logiciels fournissent aujourd'hui ces maillages à partir de la CAO, la situation reste beaucoup plus complexe pour les représentations discrètes du corps humain. Il n'existe pas à ce jour de méthode reconnue et rapide (l'idéal à atteindre serait le temps quasi-réel) permettant la construction automatique des maillages adaptés aux calculs électromagnétiques d'une personne particulière, par exemple à partir de ses coupes scanner.

**Champ et santé, bioélectromagnétisme:** L'intérêt de la communauté du Génie Électrique pour la question des effets biologiques des champs électromagnétiques n'est plus à démontrer. Le Laboratoire Ampère a beaucoup investi dans le quadriennal précédent, au travers de ses équipes « Modélisation » et « Microsystèmes et microbiologie », pour avancer dans la compréhension des mécanismes d'interaction entre champs et cellules, et dans l'adaptation des méthodes de calcul des champs au cas spécifique des champs et courants dans les tissus biologiques. Une partie de ces travaux a déjà profité de collaborations avec l'UFMG, où 2 thèses sont encore en cours sur ce type de sujet. Au-delà de la compréhension des phénomènes mis en jeu, les applications peuvent être normatives (tel dispositif respecte-t-il la norme en rayonnement ? calcul de SAR), ou thérapeutiques (hyperthermie pour le soin de tumeurs cancéreuses).

Mais les applications bioélectromagnétiques vont au-delà de cela : caractérisation électromagnétique au niveau du détail cellulaire (membrane, cytoplasme) ou déplacement de cellules par diélectrophorèse ou électrorotation ; caractérisation expérimentale de l'électroporation sous champ impulsif, applications à la biodépollution ou à la cancérologie ; pile à combustible biologique (production directe d'électricité à partir de bactéries).

### Axe 2: Inversion et réduction de modèles

À l'aval des problématiques précédentes, dès lors qu'un modèle rigoureux est établi, se posent des questions d'inversion et de réduction de modèle. La prise en compte des hétérogénéités introduit de fortes non linéarités qui complexifient l'analyse des propriétés structurelles du système et l'exploitation du modèle pour des problèmes d'identification et de recalage. Des modèles plus adaptés peuvent être construits à partir de calculs d'équivalence réalisés à l'échelle inférieure (démarche analytique), ou directement à partir de mesures « macroscopiques » judicieusement choisies (démarche phénoménologique). De plus, il existe souvent des invariances géométriques qui permettent de simplifier les modèles numériques.

D'autre part, la démarche d'inversion est capitale dans la phase de conception de systèmes ou de composants d'un système. Dans la pratique, une stratégie de surdimensionnement est adoptée de façon récurrente pour palier les lacunes des modèles macroscopiques simplifiés qui sont utilisés dans cette démarche. Là aussi, il existe un besoin en termes de méthodes permettant de réduire la complexité des modèles tout en tenant compte de la réelle nature des phénomènes physiques. Des objectifs de développement et d'exploitation de nouvelles méthodes issues de l'automatique sont à envisager.

**Inversion des modèles de systèmes multi-échelles:** La résolution des problèmes d'inversion et de réduction de modèles s'inscrit dans une démarche de développement d'outils et de techniques nécessaires à la maîtrise des différentes étapes de conception d'un système. Ces étapes concernent le dimensionnement et le choix des éléments constitutifs de la partie physique, l'identification de paramètres, ainsi que la synthèse de lois de commande. Dans le cas linéaire ces problèmes ont été largement étudiés, mais certaines difficultés subsistent en dimension infinie. Pour les systèmes linéaires à temps variant, la théorie des modules apporte des solutions partielles. Dans le cas non linéaire, certaines solutions ont été apportées, mais le cadre multi-échelles reste un challenge.

Les difficultés associées à l'inversion sont issues de la réorganisation des équations traduisant le comportement physique du système de façon à exprimer des variables (entrées ou paramètres) en fonction des sorties. Des méthodes d'inversion exploitant la représentation de systèmes physiques par graphes de liaison (Bond Graph) et s'appuyant sur les notions de causalité (et bicausalité) se sont avérées pertinentes dans la recherche des conditions d'inversibilité et la détermination du modèle inverse. L'intérêt de ces approches réside dans le fait qu'elles permettent l'étude de la cohérence structurelle des problèmes posés par une représentation graphique, ce qui a l'avantage de la rendre plus intuitive. Cette approche par graphe de liaison s'applique aussi bien pour des systèmes linéaires, non linéaires et de dimension infinie.

La réduction de systèmes multi-échelles s'insère comme un élément fondamental des différents points soulevés précédemment en permettant de réduire la complexité de ces modèles tout en conservant certaines propriétés structurelles, ainsi que les dynamiques d'interaction prépondérantes entre les différentes échelles. La réduction est donc à envisager conjointement avec la démarche d'inversion, pour remédier soit à la non faisabilité, soit aux difficultés de réalisation numérique. Il s'agit alors de définir des critères d'évaluation de l'approximation réalisée, en se basant par exemple sur des considérations énergétiques ou fonctionnelles.

Ces 2 aspects constituent des enjeux méthodologiques qui trouveront un intérêt dans différents contextes comme par exemple: la synthèse de lois de commande, la localisation de capteurs, le diagnostic et l'observation, la planification et la recherche de trajectoires

**Méthodes de caractérisation et d'homogénéisation:** Les matériaux (électriques et biologiques) sur lesquels agissent les champs ont souvent des structures microscopiques très compliquées, qui se traduisent expérimentalement par des comportements macroscopiques eux aussi compliqués (hystérésis magnétique, supraconducteurs, tissus biologiques, ...).

Les calculs numériques réalisés en présence de ce type de matériaux ne peuvent s'appuyer sur une description systématique à l'échelle la plus fine ; même si cela était possible, ce ne serait pas efficace en termes de puissance de calcul mise en jeu. Il est donc nécessaire de construire des modèles de comportement adaptés à chaque échelle de modélisation. Si des travaux existent depuis longtemps dans ce domaine, beaucoup reste à faire. En particulier, le spectre des excitations en champ à prendre en compte s'élargit avec les années (fréquences de plus en plus élevées, excitations non sinusoïdales, apparition de micro dispositifs), des matériaux jusqu'ici moins étudiés sont de plus en plus utilisés (composites), et les modèles trop simples des matériaux biologiques ont montré leurs limites.

Nous nous intéresserons particulièrement à ce lien entre expérimentation et modélisation pour la caractérisation multi-échelle des matériaux complexes (matériaux magnétiques, matériaux biologiques), y compris en mettant en commun nos compétences en modélisation et mesures avec d'autres groupes (notamment au sein du LIA Maxwell).

### **Axe 3: Optimisation pour la conception des systèmes**

L'innovation est aujourd'hui intimement liée au triptyque coût-énergie-performance. Avec les avancées des technologies actuelles, ceci conduit à une multiplicité de critères de conception et de solutions envisageables. La méthode consistant à optimiser un élément du système sans tenir compte de la globalité du problème ne garantit en rien l'obtention d'une solution pertinente. La recherche d'une "bonne solution" doit passer par une approche globale de l'optimisation. Dans cet objectif, la modélisation multi-échelle se révèle particulièrement bien adaptée car elle rend compte des interactions internes au système.

**Optimisation et problèmes inverses pour la conception:** 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.

Vu des méthodes numériques, il s'agit de passer des outils d'analyse d'un dispositif parfaitement spécifié à l'optimisation de ce dispositif par rapport à un ou plusieurs objectifs. L'effort de recherche pourra porter en particulier sur l'optimisation robuste (prenant en compte la variabilité, ou la sensibilité aux variations des paramètres).

Le problème industriel est souvent celui de l'efficacité de la conception numérique, face à un problème d'un type donné résolu un grand nombre de fois. Les industriels sont particulièrement désarmés lorsqu'ils doivent choisir la méthode d'optimisation qui convient le mieux ; nos équipes sont bien placées pour travailler à la caractérisation de méthodes d'optimisation optimales pour une classe donnée de problèmes, voire à la mise au point de méthodes d'optimisation adaptatives (face à une famille donnée de problème, elles amélioreraient leur efficacité à mesure qu'elles le résolvent dans un plus grand nombre de réalisations particulières).

Nos compétences complémentaires dans le domaine de la conception de dispositifs ou systèmes nous permettent maintenant d'aborder ce problème qui porte sur la réflexion méthodologique en amont, sur les méthodes et outils de capitalisation et partage de connaissance, sur les outils d'aide à la conception eux-mêmes, et jusqu'aux réalisations pratiques. Le Département "Méthodes pour l'Ingénierie des Systèmes" sera un lieu privilégié de partage d'expériences pour faire progresser les connaissances et compétences à ces différents niveaux.

**Actionneurs et systèmes de transmission de puissance:** La recherche dans le domaine relatif à la transmission de puissance (machines électriques couplées au convertisseur statique, systèmes hydrauliques/pneumatiques couplés à des servovalves, ...) dispose de technologies arrivées à une certaine maturité du point de vue des applications industrielles classiques. Cependant, pour le développement de nouvelles applications (transports : véhicules électriques ou hybrides, avion «plus» électrique ; micro actionneurs ; ...) c'est un domaine qui soulève de nombreuses questions en raison des exigences relatives au rendement et aux coûts. Ces exigences nécessitent l'optimisation globale de la structure de la transmission de puissance, de son alimentation et de sa commande, en prenant en compte la complexité des lois de comportement des matériaux.

Il y a donc là deux directions de recherche complémentaires :

- concernant les modèles de l'actionneur lui-même : amélioration des méthodes de modélisation capables de représenter de manière précise son comportement du point de vue

électrique, magnétique, fluide, thermique et mécanique ; ces méthodes doivent aussi permettre d'établir un modèle simplifié cohérent pour représenter la machine « vue du modulateur de puissance » (convertisseur, servovalve, ...),

- développement de procédures de conception et d'optimisation pour le dimensionnement de l'ensemble modulateur/actionneur à partir d'un cahier de charge donné.

Ces méthodes et procédures de conception seront mises en œuvre pour des architectures hybrides (électrique/thermique, électrique/fluide), des microsystèmes fluidiques, et des classes de machines présentant de nouvelles topologies magnétiques. On peut par exemple citer les machines à haute vitesse de rotation dont les enroulements d'excitation et les aimants permanents sont transférés sur la partie fixe de la machine, permettant une utilisation plus efficace de ces matériaux ; les machines synchrones sans balais, les machines à aimants permanents et flux axial, les moteurs linéaires pour applications pétrolières on-shore, ... Le dimensionnement optimal de telles machines fait intensivement appel aux techniques les plus modernes d'optimisation et de calcul 3D.

En particulier, nous pourrions être appelés à participer à un projet brésilien concernant une application médicale très pointue et à bonne image sociétale : il s'agit d'un actionneur d'assistance cardiaque implanté avec batterie et convertisseurs, rechargeable par induction depuis l'extérieur, garantissant au patient une qualité de vie améliorée.

### **Pertinence des perspectives et positionnement**

Les préoccupations de ce nouveau groupe de recherche sont proches de celles qu'on trouve dans d'autres Laboratoires, par exemple pour la France au G2ELab (équipe MAGE). En particulier, l'affichage vers la conception et les systèmes répond à une logique d'évolution qui dépasse l'échelle d'un laboratoire.

Néanmoins, la dialectique qui se joue entre les recherches amont et les applications particulières visées, très différentes en chaque lieu (pour Ampère, l'interdisciplinarité avec le vivant d'une part, le fluid-power d'autre part), conduit à des démarches qui, loin d'être redondantes, s'enrichissent mutuellement. Cela est d'autant plus vrai que les structures d'échange et de coordination (et même souvent d'étroite collaboration) sont en place et ont déjà montré leur pertinence ces dernières années (GDR, co-encadrements de thèses, publications communes, interventions coordonnées sur des contrats industriels, ...).

Pour les années qui viennent, cette politique de coordination va être intensifiée, en lien avec la création du LIA Maxwell et l'impulsion internationale qu'elle fournit pour les thématiques de notre Groupe : d'une manière ou d'une autre, plusieurs équipes françaises (Lille, Paris, Toulouse, ...), et l'équipe de Liège avec laquelle nous collaborons étroitement depuis 5 ans, vont s'y rattacher ou y être associées. Nous représenterons alors pour l'international un regroupement de taille et potentiel scientifique respectables, avec une ouverture originale, spécifique à Ampère, vers le Fluid-Power.

### **Dimensions sociétales des perspectives**

Certaines des applications de nos méthodologies concourent directement à apporter des éléments de réponses à des questions de société, cela a déjà été dit plus haut. L'exemple le plus frappant concerne la difficile question des effets des champs sur les êtres vivants, et des avancées attendues à partir de nos travaux de modélisation et de caractérisation. En France, cette question a un gros impact « sociétal » : organisation au printemps 2009 du « Grenelle des ondes » par le gouvernement français ; multiples manifestations de l'inquiétude du public face aux lignes à haute tension, systèmes WIFI, aux antennes de téléphonie mobile, etc. Par ailleurs, des travaux menés sur les applications thérapeutiques de l'électromagnétisme participent à améliorer l'image de ces techniques. Mais on peut aussi souligner que la conception optimale de systèmes multiphysiques est intimement liée aux économies d'énergie, c'est-à-dire aux préoccupations environnementales globales.

Plus généralement, nos problématiques sont passionnantes, difficiles, et riches d'apports scientifiques potentiels : on aborde en effet par ce biais des questions multi physiques, multi modèles, multi échelles, et d'autres problèmes complexes comme la variabilité. Elles nous poussent fortement vers l'interdisciplinarité ; les collaborations et méthodologies mises en œuvre dans ce contexte particulier auront probablement des retombées intéressantes dans d'autres domaines, fondamentaux ou applicatifs, peut-être inattendues, mais c'est aussi là ce que la Société attend de sa Recherche.

## **Collaborations envisagées**

### **Au niveau national**

- [GDR SEEDS](#) ([socle](#) Méthodes et méthodologies et plate-forme de capitalisation de connaissances [DIMOCODE](#)), [GDR MACS](#) (GT EDP, SYSME), [GDR Ondes](#) ([GT6 : CEM](#)).

- avec le G2ELab (UMR 5269), 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): modélisation en électromagnétisme.
- avec XLIM (UMR 6172) et l'équipe Nachos de l'INRIA (Sophia Antipolis) : prise en compte des incertitudes, problématiques de résolution des équations de Maxwell dans des milieux hétérogènes (plus particulièrement avec Nachos), interaction des champs avec les cellules biologiques (plus particulièrement avec XLIM).
- avec le LAGIS (UMR 8146), le LAPLACE (UMR 5213) et le GE2Lab (UMR 5269): problématiques d'inversion des modèles dynamiques et dimensionnement.
- avec le LAGEP (UMR 5007) et le LMFA (UMR 5509): problématiques de modélisation des systèmes-multi-échelles.

### Au niveau international

Pour les aspects liés à la modélisation en électromagnétisme :

- dans le cadre du Laboratoire International Associé franco brésilien James Clerk Maxwell (LIA Maxwell), partenariat avec 3 universités brésiliennes (Universités Fédérales de Minas Gerais, Belo-Horizonte et de Santa Catarina, Florianópolis ; Université de São Paulo).
- l'Université de Liège (Patrick Dular), cette équipe faisant indirectement partie du LIA Maxwell.

Pour les recherches concernant l'inversion et le dimensionnement des systèmes multi-physiques :

- Centre for Power Transmission and Motion Control, Bath, UK (R. Fotsu N'Gwompo),
- University of Rosario, Argentina (S. Junco).

Dans le contexte de la modélisation des systèmes-multi-échelles et des ports d'interactions :

- Université de Groningen, Pays-Bas (A.J. van der Schaft).

Enfin pour les applications du domaine du Fluid Power :

- les universités européennes partenaires du réseau Fluid Power Centres in Europe ([FPCE](#))

### Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet

Le groupe compte 9 permanents, avec un bon équilibre des disciplines de base (4 sont typés Génie Electrique). 2 départs prévisibles dans les 2 années à venir risquent de mettre à mal cet équilibre qui est nécessaire à la réussite du projet scientifique : il faut veiller dès maintenant à ce que les renouvellements soient assurés, et le soient par des personnes qui puissent rétablir cet équilibre.

### Mot du (des) responsable(s)

A partir des années 2000, plusieurs tentatives ont été faites pour pousser l'équipe « modélisation » du CEGELY vers une réflexion amont sur les couplages de méthodes et l'approche systèmes, en particulier (sous ma direction) de 2003 à 2006. Cela n'avait pas apporté tous les fruits attendus, probablement parce qu'une telle évolution est difficile en « vase clos ».

Le groupe que nous mettons en place cette fois-ci représente un vrai mélange de compétences, du fondamental à l'industriel, du fluid-power à la CEM, avec une envie partagée d'apprendre les uns des autres : nous avons 4 années pour montrer qu'émergent de ce système des propriétés plus intéressantes que celles de ses éléments séparés !

## Groupe "Automatique, commande et mécatronique"

**Objectif général :** développement d'outils méthodologiques pour l'analyse et la commande de systèmes dynamiques complexes, transfert et adaptation aux systèmes mécatroniques

**Mots-clés :** automatique, commande, optimisation, identification, estimation, observation, capteur logiciel, planification de trajectoires, robustesse, robotique médicale, systèmes pneumatiques, systèmes hydrauliques

### Structure et compétences du groupe

Le groupe est structuré en 3 axes à caractère fondamental en interaction forte avec les systèmes mécatroniques étudiés et leurs domaines d'application (cf. figure 1). Le groupe développe des méthodes et des outils liés à l'Automatique pour la conception et la commande des systèmes mécatroniques dans le cadre du transport, de la robotique médicale, des systèmes nomades, de l'aéronautique, de l'aérospatial et de l'habitat. Ces nombreux champs d'applications très variés et très complexes ont dans notre cadre d'étude un socle commun qui repose sur les compétences du groupe dans le domaine de l'Automatique, des systèmes Fluid Power et des systèmes Mécatroniques.

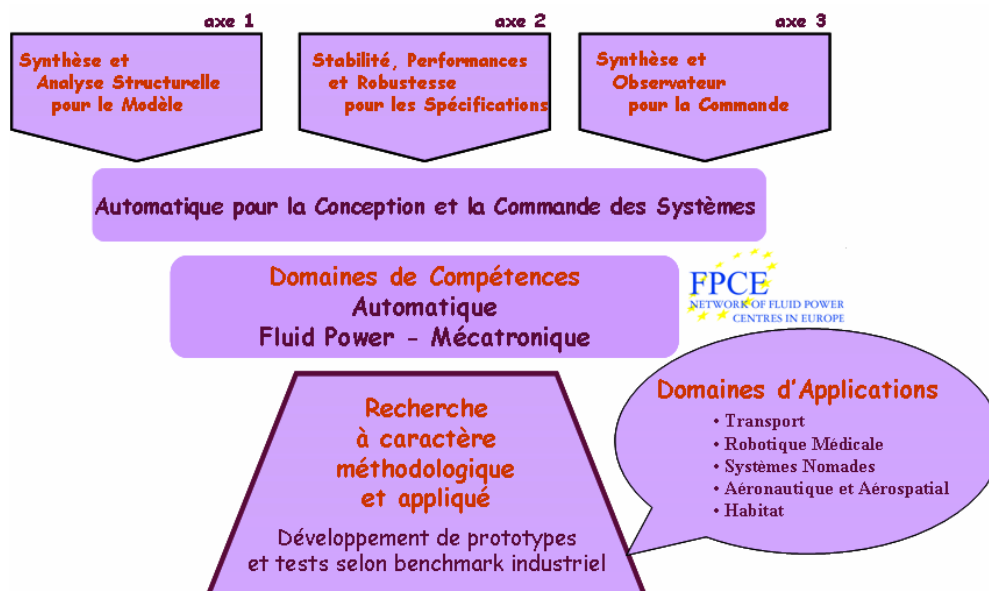


Figure 1 : présentation du groupe « Automatique, commande et mécatronique »

Les 3 axes ont pour thématiques :

**Axe 1 :** Synthèse et Analyse Structurelle pour le Modèle

- Approximation, discrétisation et réduction de modèles
- Analyse structurelle et dimensionnement des systèmes mécatroniques
- Méthodes d'identification des systèmes complexes

**Axe 2 :** Stabilité, Performances et Robustesse pour les Spécifications

- Adéquation cahier des charges et modèle de conception
- Stabilité/stabilisation et performances atteignables de systèmes complexes
- Développement d'outils vis-à-vis des incertitudes de modélisation

**Axe 3 :** Synthèse et Observateur pour la Commande

- Synthèse des capteurs logiciels
- Commande robuste pour des outils mieux maîtrisés pour les ingénieurs
- Synthèse de commandes pour des systèmes fortement non linéaires

## Perspectives de recherche

### Contexte et objectifs

Aujourd'hui l'excellence de l'Automatique en France provient en grande partie de développements théoriques avec une forte implication des personnes se référant aux Mathématiques Appliquées. L'originalité de l'Automatique dans Ampère repose sur les compétences résultant de l'interaction entre la théorie et la pratique, entre le fondamental et le système physique. Ceci dans le but de participer à l'objectif général et fédérateur du Laboratoire, dont les recherches ont pour objectif l'ingénierie écologique et l'ingénierie des systèmes mécatroniques, en incluant leur efficacité énergétique et leurs interactions avec l'environnement

Une force du laboratoire Ampère repose sur les compétences en Automatique pour la conception et la commande des systèmes : l'Automatique est une discipline qui repose sur une approche intégrée, une approche système qui consiste à aborder successivement les points suivants :

- Formaliser mathématiquement un cahier des charges
- Développer des méthodes
- Adapter et programmer des prototypes d'outils d'analyse et de commande
- Aborder des applications

Une originalité que présente donc le laboratoire repose donc sur sa double compétence concernant les aspects fondamentaux et la connaissance du système physique. Ceci justifie pleinement l'organisation matricielle du groupe en termes d'axes fondamentaux en interaction avec les systèmes et leur domaine d'application.

**Aspects fondamentaux** : différents domaines de compétences au service d'Axes Scientifiques

Objectifs : développement théorique pour l'élaboration de méthodologies et d'outils d'Automatique pour la conception, la modélisation, l'analyse, la stabilisation, la commande, l'observation et l'optimisation de systèmes complexes.

**Système physique** : différents domaines de compétences au service de Domaines d'Applications

Objectifs : Intégration et développement de composants, de sous-systèmes et de systèmes mécatroniques à hautes performances statiques, dynamiques et à faible consommation énergétique.

### Perspectives

Parmi les verrous et défis scientifiques identifiés à ce jour nous avons pour ambition de contribuer au développement scientifique de chacun des axes du groupe selon les points suivants:

#### **Axe 1 : Synthèse et Analyse Structurelle pour le Modèle**

- Développer des modèles de systèmes complexes pour une utilisation en simulation et en analyse.
- Epauler le concepteur en développant des outils d'analyse systématique et adapté pour le dimensionnement afin d'explorer en phase amont le plus grands nombre de solutions et d'assurer la robustesse de la conception par rapport aux différentes incertitudes.
- Mettre au point de méthodologies permettant d'approcher le comportement entrée-sortie des systèmes complexes d'un point de vue temporel et fréquentiel.

#### **Axe 2 : Stabilité, Performances et Robustesse pour les Spécifications**

- Développer des critères et des méthodes afin de caractériser la stabilité et les performances de systèmes complexes.
- Caractériser la robustesse des systèmes en dimension finie ou infinie, en s'appuyant sur une approche fréquentielle.
- Analyse de la stabilité des systèmes dynamiques hybrides.

#### **Axe 3 : Synthèse et Observateur pour la Commande**

- Développement d'observateurs / estimateurs via des techniques modernes d'Automatique (approche d'état, modes glissants, robustesse)
- Intégration de capteurs logiciels et de commandes sur composants spécifiques.
- Enrichir le savoir faire du groupe en terme de commande des systèmes Fluid Power.

Les exigences de performance, d'efficacité et de qualité sont plus en plus importantes lors de la conception de systèmes et la recherche du meilleur « compromis » a entraîné une extension de l'utilisation de boucles de rétroaction faisant intervenir des systèmes de commande. Bien que plus complexes à concevoir, elles sont néanmoins incontournables pour répondre à de tels niveaux d'exigence. Les conséquences sont importantes :

- les méthodes de conception traditionnellement répandues dans l'industrie sont trop limitées pour traiter des cahiers des charges de plus en plus serrés pour la commande de systèmes de plus en plus complexes (multivariables, dimension infinie, etc..) pour des temps de développement de plus en plus courts ;
- la démarche traditionnelle qui consiste à concevoir un système puis son correcteur n'est plus adaptée : il apparaît nécessaire de procéder à la conception intégrée du système et de son correcteur, soit de l'ensemble de la boucle de rétroaction ;
- lorsqu'un niveau de performance et d'efficacité important est recherché, la prise en compte de l'information limitée (incertitude) sur les systèmes doit être explicitement prise en compte ; l'incertitude peut aussi résulter des dispersions liées à la production en série d'un système ou à son vieillissement : il est crucial de garantir la performance et l'efficacité de ce système dans ce cas-là.

Il apparaît nécessaire de participer au développement de nouveaux outils mieux maîtrisés et efficaces de conception, de préférence simples d'utilisation, pour établir de nouvelles méthodologies (pas forcément simplistes), à l'usage des ingénieurs, ce qui pose d'une part *des enjeux fondamentaux* importants :

- un cahier des charges complexe et serré invalide dans bien des cas l'hypothèse de linéarité et de dimension finie : par exemple les effets non linéaires ou discontinus des systèmes ne sont plus négligeables, ou même s'ils le sont, des correcteurs non linéaires ou discontinus sont souvent nécessaires pour satisfaire aux exigences de performances et d'efficacité ;
- la recherche du meilleur compromis implique l'introduction de l'optimisation : cependant l'efficacité des outils à développer revient à substituer à la question traditionnelle « comment modéliser au mieux un problème d'ingénierie par un problème d'optimisation ? » la question « comment modéliser au mieux un problème d'ingénierie par un problème d'optimisation admettant un algorithme de résolution efficace ? »
- la prise en compte de l'incertitude augmente fortement la complexité du problème de conception : la complexité d'un problème de linéaire incertain peut être de même niveau que celle d'un problème non linéaire ;

Et d'autre part *des enjeux systèmes* importants :

- approche intégrée de la commande et de la conception
- améliorer le processus actuel de conception de structures existantes de systèmes
- créer de nouvelles structures de systèmes

Le constat est qu'on ne peut pas aborder ces enjeux en traitant séparément les enjeux théoriques et les enjeux pratiques, les interactions entre la maîtrise des aspects fondamentaux et le développement de compétences système est pour le groupe « Automatique, commande et mécatronique » un gage de réussite de nombreux projets scientifiques. Ceci dans le but de développer des méthodes/outils adaptés à l'utilisateur et pas simplement à la théorie sous jacente. Par exemple dans le cadre de l'observation et estimation paramétrique : le groupe se devra d'exploiter les possibilités offertes par les développements récents de la théorie de la robustesse pour la conception d'observateur et de filtres, ou encore ; mettre au point des outils de prédiction dans l'incertain dans un objectif de Maintenance/Diagnostique. (Indice de confiance par rapport à l'horizon de prédiction, exemple temps restant de bon fonctionnement du système dans la continuité de l'estimation robuste.)

### **Perspectives concernant les domaines fondamentaux :**

- Elaborer des **méthodes et outils d'Automatique des systèmes linéaires** (observation et commande), améliorant la pratique de l'Automatique tout en respectant le savoir faire existant. Il s'agit d'exploiter les théories des approches algébriques et entrée/sortie et les possibilités offertes par le calcul formel et l'optimisation. L'approche entrée/sortie, centrée sur les propriétés de bouclage, englobe l'analyse de la robustesse, la commande robuste, l'optimisation convexe semi définie. L'approche algébrique, appliquée aussi bien en dimension finie qu'infinie, exploite la transformée de Laplace pour l'analyse tempo-fréquentielle avec des méthodes en grande partie semi-analytiques basées sur les avancées en calcul formel et en calcul numérique. Les verrous scientifiques abordés concernent d'une part la prise en compte du caractère infini et incertain des systèmes dans l'application des méthodes d'Automatique de dimension finie et d'autre part la représentation, l'approximation, la stabilisation et la robustesse de systèmes à paramètres distribués par des classes d'opérateurs linéaires. Le compromis entre robustesse et performances passe par le développement d'outils et de méthode en termes d'inversion, d'observation, de prédiction et de commande.

- L'étude des **systèmes non linéaires** pour le développement de méthodes de commande des systèmes non linéaires, en continuité avec les méthodes linéaires et leur savoir-faire associé. Il s'agit d'exploiter la commande non linéaire (géométrique, modes glissants, hybride, etc.) et l'extension de la commande robuste aux systèmes non linéaires via la notion de norme incrémentale. Ces concepts posant un cadre mathématique rigoureux, il s'agit d'évaluer les potentialités de la théorie des systèmes linéaires à paramètres variant dans le temps pour la synthèse pratique de commandes non linéaires. Les problèmes scientifiques abordés concernent l'étude des performances et des marges de robustesse de systèmes bouclés non linéaires, la commande des systèmes hybrides, et l'identification et la commande de systèmes fortement non linéaires.
- Dans le cadre de **la conception, l'analyse structurelle et l'optimisation**, le groupe devra développer des méthodes d'étude de la faisabilité d'un cahier des charges pour des problèmes d'Automatique : commande, filtrage, estimation, le dimensionnement de systèmes bouclés. Ces problématiques s'appuient sur l'analyse structurelle des systèmes qui consiste, à partir d'un modèle analytique d'un système, à caractériser la faisabilité de la conduite et du pilotage du système, par le biais de formes canoniques et d'indices invariants pour certaines transformations mathématiques. Les moyens mis en œuvre dans cette thématique sont le développement de méthodes originales pour l'identification et l'estimation robuste de systèmes, la caractérisation d'indices structurels pour les systèmes linéaires de dimension finie et infinie, et l'étude de stratégies de pilotage et de conduite de systèmes (découplage, rejet de perturbation, poursuite de modèle, robustesse), afin de résoudre entre autre des problèmes inverses. Les problèmes scientifiques abordés concernent l'équivalence de structures de conduite et de pilotage des systèmes, l'étude de structures canoniques pour les systèmes en dimension infinie et leur application pour la résolution aux problèmes de commande.

#### Perspectives dans le domaine du Système :

- La reconnaissance internationale d'Ampère au niveau des **activités Fluid Power** doit lors du prochain quadriennal être pérennisée. Ces activités surtout reconnues pour la modélisation et la commande des systèmes à fluide sous pression ont permis à Ampère d'être le seul laboratoire français présent dans le réseau européen Fluid Power Centres in Europe (FPCE). Ce nouveau quadriennal doit permettre de conforter la place d'expert que tient le groupe sur la commande des systèmes électropneumatiques. Le développement de systèmes complexes de plus en plus intégrés et de plus en plus compétitif ouvre les portes de nouveaux problèmes théoriques et technologiques. Prenons pour exemple le développement de servovérin piloté par des distributeurs tout ou rien en lieu et place de servodistributeurs qui pose et posera d'une part des problèmes de stabilité et permettra au groupe de travailler sur la stabilité des systèmes dynamiques hybrides et la stabilité des dynamiques résiduelles. D'autre part les techniques de commande devront être choisies et adaptées ou développées pour améliorer les performances statiques et dynamiques de tels systèmes (sliding, LPV ...) en visant un spectre très large de performances. Ces travaux méthodologiques et appliqués en interaction avec les aspects fondamentaux du groupe, sont liés aux deux points suivants. La robotique médicale utilise très souvent des actionnements fluide fort appréciés pour leur compliance et le rendu qu'ils peuvent apporter lors de développement de simulateur de gestes médicaux. Les convertisseurs de puissance constitue des systèmes dynamiques hybrides (SDH) également et les problème fondamentaux lié à leur stabilité doivent être étudiés.
- **Robotique médicale** : 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. Nous souhaitons développer et proposer des simulateurs médicaux réalistes, intégrant différentes modalités : suivi en position, retour et guidage haptique, immersion sensorielle (rendu sonore, rendu visuel des déformations mécaniques, guidage visuel par réalité virtuelle augmentée). Nous souhaitons valider ces simulateurs sur plusieurs populations de médecins (experts, internes, novices) et proposer une approche unifiée par la comparaison du geste médical.
- Nous avons également initié, durant ce dernier quadriennal, une **activité originale sur la commande et la gestion d'énergie en électronique de puissance et électronique intégrée**. Cette activité de recherche présente encore de nombreux défis théoriques et

surtout, a un impact important sur les applications pratiques. Les convertisseurs de puissance peuvent être considérés comme des SDH. Les commandes proposées dans la communauté des SDH ne sont pas envisageables pour les convertisseurs de puissance et encore moins pour les convertisseurs intégrés à cause des contraintes de temps réel. Notre objectif consiste à exploiter l'approche prédictive directe initiée au Laboratoire Ampère, reconnue par les communautés nationales et internationales. Actuellement, l'aspect prédictif a été réalisé pour l'horizon d'un pas. Nous envisageons d'élaborer des stratégies de décision prenant en compte l'optimisation énergétique de la commande et à plusieurs pas de prédiction afin de définir une séquence de commande qui optimise au mieux les performances souhaitées. Les verrous sont à la fois théoriques et technologiques. Nous cherchons à résoudre les problèmes liés à la stabilité (phénomène bifurcation, chaotique...) et à l'observation des grandeurs non mesurées (observateur interconnecté adaptatif...) sans oublier l'objectif d'intégration pour des applications à haute tension et haute température (health monitoring et reconstitution des grandeurs par observateurs) en collaboration avec le département « Energie Electrique ».

### Dimensions sociétales des perspectives

Au cœur de nombreux sujets sociétaux, l'énergie est une préoccupation forte du groupe. En effet concevoir, piloté un système intégrée ne peut se faire aujourd'hui sans l'objectif de faible consommation énergétique. Les travaux dans le domaine de la santé effectué plus particulièrement en robotique médicale ont des dimensions sociétales évidentes en termes de diminution des risques médicaux liés à la formation, d'amélioration de la formation des professionnels dans le milieu hospitalier, de la certification des médecins par un contrôle qualité de leurs gestes e ainsi que dans le développement de nouvelles stratégies thérapeutiques.

### Collaborations universitaires existantes et envisagées

#### Internationales :

- Delft University of Technology, Pays-Bas : *identification pour la commande, filtrage robuste*
- Advanced Man-Machine Interface Laboratory, Department of Computing Science, Edmonton, Alberta, Canada: *simulateurs médicaux*
- Laboratoire LIVIA, ETS de Montréal, Canada : *commande par vision d'endoscope*
- Center of Machine Perception de Czech Technical University de Prague, République Tchèque : *développement de systèmes mécatronique (exosquelette) pour la réhabilitation chez l'homme*
- Université de Sede Manizales, Colombie : *commande par vision de coloscope*
- Centre for Power Transmission and Motion Control, Bath, Angleterre : *systèmes Fluid Power*
- Institute of Computing Technology, Pékin, Chine : *gestion d'énergie des systèmes embarqués*

#### Nationales :

- INRA Jouy en Josas : *commande robuste et LPV, analyse non linéaire, systèmes biologiques*
- INRIA Rocquencourt : *systèmes de dimension infinie*
- LETI CEA : *conception d'oscillateurs*
- IRCCyN : *commande des systèmes Fluid Power, approche structurelle*
- Laboratoire ECS, Cergy-Pontoise : *stabilité et observation en électronique de puissance*
- INSERM (Espace & Action, Unité 864, Lyon, Intégration centrale de la douleur chez l'homme, Unité 879, Lyon,) : *robotique médicale et neurologie*
- LIRIS (UCBL - Lyon 1) : *développement d'interface virtuelle pour la robotique médicale*
- Laboratoire Roberval UTC (Compiègne) : *coloscope automatisé*
- INRA Nîmes : *développement de méthodes d'estimation robuste*

### Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet

En terme de moyens matériels, les dépenses à ce jour du groupe concernent essentiellement son centre d'essai Fluid Power (à l'INSA), unique dans le monde universitaire français. Ce centre d'essai (150 m<sup>2</sup>) est constitué de bancs électropneumatiques et électrohydrauliques. Ces dernières années, son développement est issu en majeure partie de fonds propres liés aux activités du laboratoire Ampère dans le domaine du Fluid Power. L'importance qu'à pris ce centre nécessite à ce jour la présence à temps plein d'un responsable qui aura pour mission de veiller à son utilisation et son développement : veille scientifique et technologique, formation, conception, sécurité, maintenance achat... Ce spectre large de compétences nécessite donc l'embauche d'un ingénieur ayant une forte expérience dans le domaine du Fluid Power.

Les activités dans le domaine de la commande des systèmes en électronique de puissance à l'interface avec le département « Energie Electrique » est à ce jour en sous effectif. Une première demande est en cours pour embaucher un enseignant-chercheur maîtrisant le domaine de l'Automatique et du Génie Electrique pour travailler sur l'adéquation synthèse de commande et consommation énergétique dans les systèmes complexes.

De plus les perspectives sont marquées par le renforcement des activités fondamentales, maintenant structurées en axes fondamentaux. Pour participer à ce développement, il s'avère nécessaire de recruter au moins un enseignant-chercheur avec de fortes compétences fondamentales en Automatique.

### **Aspects formation**

Tous les chercheurs du groupe « Automatique, commande et mécatronique » sont également enseignants et interviennent tous en formation à l'Ecole centrale de Lyon (ECL) et à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon (INSA) dans le domaine de l'Automatique pour enseigner les concepts de bases (aspect fondamental) à des ingénieurs (aspect système) de différents départements : Energétique, Mécanique, Electrique (aspect mécatronique).

- ECL : organisation et responsabilité de l'enseignement d'Automatique continue et Signal, co-resp. option énergie,
- INSA de Lyon : département Génie Electrique (GE) et Génie Mécanique Conception (GMC) organisation et responsabilité des enseignements d'Automatique continue et discrète, enseignement des Mathématiques et de l'Analyse Numérique en GMC, enseignement de la mécanique, de la conception, de la production automatisée et de la mécatronique au premier cycle (PC)
- Master Recherche :
  - o GEGP sur Lyon co-resp de la filière GSA pour l'ECL et l'INSA,
  - o enseignement Master Electronique et Automatique (Caen),
  - o enseignement Master Automatique et Traitement du Signal et des Images (Orsay)

### **Mot du (des) responsable(s)**

Les objectifs et les perspectives fixés pour l'émergence de nouvelles méthodes de commande et de conception résultent pour le groupe « Automatique, commande et mécatronique » plus de l'interaction de différentes thématiques fondamentales et systèmes bien maîtrisés que de l'hyper spécialisation sur des thématiques pointues. Les compétences fortes de ce groupe dans le domaine de l'Automatique doivent lui permettre d'être reconnu en termes de spécialistes et d'experts de méthodes et d'outils pour la compréhension, le développement, l'analyse et la commande de systèmes. Le savoir faire présent dans le groupe en termes d'analyse structurelle, de développement de système intégré robuste et de commande de systèmes linéaires, non linéaires, discontinus, se développera via des études amont et un transfert technologique en collaboration avec d'autres laboratoires et/ou industries. Les nombreux domaines d'applications répertoriés à ce jour ne doivent pas être vus comme une dispersion des membres du groupe, mais comme une force reposant sur des compétences systèmes du groupe dans le domaine de l'Automatique, du Fluid Power et de la Mécatronique au service d'applications dans le transport terrestre, la robotique médicale, les systèmes nomades, l'aéronautique, l'aérospatial et l'habitat.

## Groupe "Fiabilité, diagnostic et supervision"

**Objectif général :** Maîtriser la Sûreté de Fonctionnement des composants et des systèmes au travers des indicateurs de sûreté et des moyens assurant le fonctionnement.

Le groupe « Fiabilité, diagnostic et supervision » (FDS) s'identifie clairement dans l'assurance d'une continuité de service. Il convient donc d'évaluer la durée de vie du système pour estimer son état fonctionnel, de détecter la présence d'une panne ou d'un défaut avéré ou progressif pour expliquer voire prédire le dysfonctionnement et enfin en cas de défaut majeur, d'autoriser des fonctionnements tolérants aux fautes. Les travaux sont appréhendés au niveau physique, informationnel et commande sous des compétences relevant du Génie Electrique et de l'Automatique Discrète pour des applicatifs du transport et des équipements industriels.

**Mots-clef :** systèmes de stockage d'énergie électrique, actionneurs, mécanismes de défaillance, fiabilité, maintenance prédictive, intelligence Artificielle, reconnaissance de formes, systèmes à événements discrets, reconfiguration, conception sûre

### Structure du groupe

Le groupe FDS comprend 3 axes interdépendants, Fiabilité, Diagnostic et Supervision, en cohérence avec l'objectif d'assurer une continuité de service, relevant du Génie Electrique et de l'Automatique Discrète. Les membres du groupe peuvent contribuer à un ou plusieurs de ces axes.

### Compétences du groupe

Suivant les axes, les compétences nécessaires sont différentes :

- Pour l'axe fiabilité F : modélisation du comportement physique des composants et analyse de leurs défaillances
- Pour l'axe diagnostic D : Analyse physique des défaillances des systèmes électriques, Traitement de l'information, Reconnaissance de Formes
- Pour l'axe supervision S : Systèmes à événements discrets, automatique discrète, synthèse de contrôle par supervision, vérification formelle

### Perspectives de recherche

#### Contexte

Toute entreprise humaine comporte des risques, l'application des règles de l'art, des normes, des réglementations n'est plus une garantie suffisante pour les activités à haut risque. Il convient alors de connaître les mécanismes et modes de défaillance, de les prédire et de les maîtriser. Vu l'ampleur de la problématique, nous rappellerons que si les travaux de recherche du groupe FDS couvrent bien les systèmes industriels du niveau local (composant) au niveau global (ensemble de composants pilotés) au travers d'une qualification de durée de vie et d'une confiance d'exploitation, ceux-ci restent limités par nos champs disciplinaires. Les composants étudiés sont du domaine électrique (dispositifs de stockage et convertisseurs statiques d'énergie électrique, entraînements électriques) et le niveau global se restreint aux fonctions de contrôle-commande discrètes.

#### Objectif

Dans ce contexte, les enjeux scientifiques et industriels de la Sûreté de Fonctionnement (SdF) majeurs pour les systèmes critiques que nous avons retenus (équipements industriels, transport) sont les suivants :

#### Les enjeux industriels

- position concurrentielle : de très fortes valeurs ajoutées par une meilleure fiabilisation
- des exigences de plus en plus contraignantes et des normes de sécurité de plus en plus drastiques (SIL1 à SIL4) conduisent à des validations de plus en plus difficiles à maîtriser pour des fonctionnalités de plus en plus portées par de l'informatique embarquée.

## Les enjeux scientifiques

La SdF a pour objet l'étude des systèmes soumis à des processus (phénomènes) physiques : par contre il y aura toujours une grande différence entre ceux qui se demandent "pourquoi les choses ne fonctionnent pas ?" et ceux qui se demandent "comment faire pour qu'elles fonctionnent ?" L'un des enjeux scientifiques majeurs est donc l'interaction entre la connaissance de la cause du phénomène de défaillance et la mise en œuvre des moyens pour récupérer une situation dégradée induite. Les études se complexifient lorsque les systèmes sont multi-énergies, interdisciplinaires et multi-échelles. Ainsi les enjeux scientifiques consiste à passer du local au global dans un domaine régi par l'imprévisible.

Dans ce contexte, les prospectives scientifiques du groupe FDS abordent la SdF selon une approche dite passive (analyse, évaluation, identification) pour la Fiabilité et le Diagnostic et selon une approche active (commande, reconfiguration) pour la Supervision. Les problématiques scientifiques sont alors distinctes, il s'agira pour :

- la Fiabilité de mettre en œuvre des techniques de mesure et d'identification des dérives de fonctionnement pour évaluer la durée de vie des composants. Les travaux abordés relèvent de la connaissance physique des comportements à l'expression du symptôme.
- le Diagnostic de traiter un symptôme pour identifier un dysfonctionnement et en rechercher les causes phénoménologiques. Les travaux concernent ainsi globalement le passage du symptôme à l'information.
- la Supervision de traiter l'information pour la réaction. La commande tolérante aux fautes relève alors de la capacité d'un système à fonctionner malgré les dysfonctionnements détectés et identifiés.

## Perspectives, défis relevés et les verrous adressés

Chaque axe est représenté en soulignant le contexte, les méthodologies mises en œuvre ainsi que les verrous qui lui sont propres.

### Axe F : Fiabilité ...de la physique au symptôme

L'analyse physique du comportement des composants et de leurs mécanismes de défaillance permet via une modélisation électrothermique d'estimer leur fiabilité

- Contexte

Les composants à risque dans le domaine du génie électrique sont bien répertoriés. Les systèmes de stockage d'énergie électrique et les actionneurs constituent les principales causes de défaillance des équipements. En effet, ces composants présentent une période d'usure (sur la courbe en baignoire représentant le taux de défaillance en fonction du temps) et donc une durée de vie relativement faible par rapport aux autres éléments constituant les équipements.

- Méthodologie

Etude des mécanismes de défaillance des composants à risque (systèmes de stockage d'énergie, actionneurs...), analyse multi-physique, modélisation électrothermique des composants

Identification des contraintes, des profils de fonctionnement, mise en place d'essais de vieillissement accéléré

Etude et modélisation du vieillissement, estimation de la durée de vie

Prise en compte de la fiabilité pour une rétroaction possible dès la conception des composants

Etude de la fiabilité des architectures, modèles de propagation de fautes, modèles stochastiques

- Verrous scientifiques adressés

Composants récents de plus en plus complexes (multi-physique)

Besoin d'étudier la fiabilité dès la conception (nouveaux composants)

Absence de lois précises (lois très empiriques utilisées)

### Axe D : Diagnostic ...de la physique au traitement de l'information

L'objectif majeur est de déterminer une signature (un vecteur forme) permettant une discrimination d'un ou de défauts par rapport aux autres modes de fonctionnement et à exploiter les signatures obtenues pour classifier les défauts.

- Contexte

Une fiabilisation accrue des systèmes permet de diminuer les risques de défaillance mais ne peut l'annuler. Le diagnostic et le pronostic permettant une maintenance prédictive rend possible l'annulation de ces risques.

- Méthodologie

Recherche de signatures permettant la détection et l'identification des défauts, mesures directes ou indirectes (estimées à partir d'observateurs)

Recherche de méthodes de classification des défauts (reconnaissance des formes avec phase d'apprentissage) et de prédiction de panne (maintenance prédictive), pour le pronostic : les méthodes se basent sur une analyse de tendance, l'utilisation d'extrapolateurs, de modèles de Markov cachés et de modèles physiques basés sur le vieillissement.

- Verrous scientifiques adressés

Mise en place de nouvelles méthodes de surveillance générant un faible taux de fausses alarmes, prenant en compte l'apparition de nouveaux modes de fonctionnement et dont on peut quantifier le degré d'appartenance aux différentes classes de fonctionnement.

Manque d'information et de base de connaissance pour le diagnostic, la quasi absence de méthodes de pronostic.

### Axe S : Supervision ...du pronostic à la continuité de fonctionnement

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.

- Contexte

Le comportement du système est décrit par une succession d'événements et non pas par des dates ou des durées, une faute est décrite par un événement, une panne par un état discret d'un composant, le système est tolérant aux fautes : il a encore un comportement pendant la panne

- Méthodologie

Conception sûre de systèmes : génération de composants corrects par construction, correction automatique d'erreurs de conception

Tolérance aux fautes et reconfiguration : gestion des modes et des lois de commutation, reconfiguration de ressources sur panne, génération en ligne

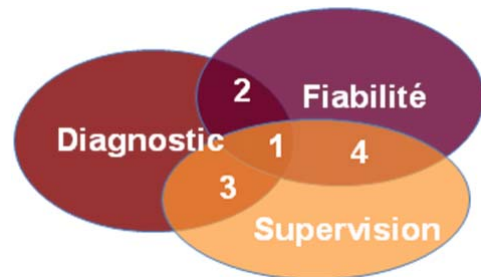
- Verrous scientifiques adressés

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

### Verrous des interactions

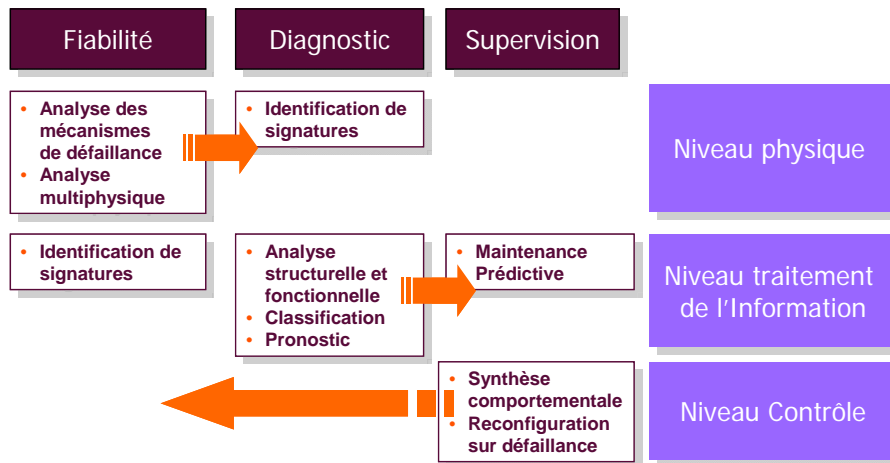
Concernant les interactions entre les axes FDS ; les verrous principaux identifiés sont (cf. figure ci-dessous) :

1. Interaction FDS : Recherche d'informations dans des bases de connaissances incomplètes ou trop volumineuses, traçabilité, recherche de données
2. Interaction FD : Identification de signatures, modélisation du comportement physique et de lois de vieillissement
3. Interaction DS : Observabilité, Déteçtabilité, Instrumentation, Diagnostic pour les systèmes tolérants aux fautes
4. Interaction FS : Causalité, Analyse des défauts



### Pertinence des perspectives

Aujourd'hui, les problèmes de fiabilité, diagnostic et supervision des systèmes sont usuellement traités de façon séparée. Il convient cependant de prendre en compte l'ensemble des interactions dans une démarche intégrée de façon à contribuer à l'amélioration de la SdF à tous les niveaux (cf. figure ci-dessous). L'évaluation des indicateurs de la SdF liée aux moyens d'assurer un fonctionnement sûr au travers des fonctions de diagnostic, pronostic, conception sûre et supervision contribue à cette démarche.



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. La continuité de cette démarche est assurée par la mixité des compétences Ampère relevant du Génie Electrique et de l'Automatique.

L'enjeu essentiel est de contribuer au développement d'une méthodologie globale de fiabilité/diagnostic/reconfiguration des systèmes complexes et/ou incertains en partant de l'établissement d'un symptôme à un "modèle de diagnostic" jusqu'à la phase de reconfiguration du système.

### Positionnement

Depuis une vingtaine d'années, des compétences fortes ont été développées par plusieurs membres de ce groupe dans le domaine de l'amélioration de la sûreté de fonctionnement et dans son application sur les dispositifs de stockage d'énergie et des actionneurs. L'étude des mécanismes de défaillance des principaux éléments à risque permettant une meilleure fiabilité des équipements électrique et électronique peut donc être considérée.

Si nous considérons isolément le diagnostic, nos propositions se particularisent sur l'extension de nouvelles techniques de reconnaissance de forme (RdF) et de méthodes basées sur les modèles.

Concernant nos travaux sur la commande réactive ceux ci se situent au niveau de la couche supérieure de commande dite de supervision et se positionnent au sein de la communauté des systèmes à événements discrets (l'événement considéré étant l'occurrence de la défaillance). Ici, nos travaux sont d'ordre méthodologique et concernent l'implantation de commande synthétisée sûre de ses capacités de reconfiguration après faute. En étendant dans ce contexte, des approches formelles de synthèse et de vérification, nos travaux occupent une place originale dans la communauté.

### Dimensions sociétales des perspectives

Le coût d'une défaillance d'un équipement est très élevé et peut s'avérer inestimable :

- dans les dispositifs destinés aux marchés médicaux, nucléaires, militaires ou de transport la panne d'un seul composant peut mettre une vie en jeu
- dans le domaine industriel, d'une panne inattendue résulte inévitablement un manque de production
- dans les domaines nécessitant une grande sécurité (banques, services financiers, chimie, informatique...), la défaillance d'un système est souvent inacceptable.

Les dimensions sociétales des perspectives du groupe sont donc liées aux enjeux sociétaux de la Sûreté de Fonctionnement (SdF), ces derniers sont les suivants :

- Développement Durable : éviter le gaspillage de ressources pour minimiser l'énergie cela se répercute sur une surcharge de fonctions et d'interactions,
- Relation de l'homme à son environnement, prise en compte de l'opérateur dans la boucle décisionnelle.

Les membres du groupe interviennent dans un grand nombre de formations où les aspects de la Sûreté de Fonctionnement sont traités. C'est le cas par exemple en 1<sup>er</sup> cycle au département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT Lyon 1, en 2<sup>ème</sup> cycle au département Génie Industriel de l'INSA de Lyon ou en Master Génie Electrique, Génie des Procédés de l'Université Lyon 1.

Enfin, les étudiants investis par la problématique FDS relèvent en majorité des 3 parcours recherche du master GEGP (GE, GSA, DEI) et de l'école doctorale EEA.

## Collaborations envisagées

### Internes au laboratoire

Groupe « Automatique, commande et mécatronique » : observateur

Groupe « Électronique de puissance et intégration » : convertisseurs d'énergie statiques

### Nationales

LAMCOS : études des paramètres électriques sensibles aux défauts mécaniques

LASPI : études des paramètres électriques sensibles aux défauts mécaniques

GREEN : études des défauts dans les machines synchrones

LAPLACE : diagnostic des entraînements électriques en avionique

LTE INRETS : fiabilité des batteries lithium ion

LUSAC : fiabilité des convertisseurs d'énergie statiques

LAAS : diagnostic par approches discrètes

CRAN : vérification des spécifications et supervision industrielle

VERIMAG : approches formelles et conception sûre

### Internationales

PCP PDVSA-Vénézuéla

PHC Tassili-Skikda

## Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet

- Centre de caractérisation et de fiabilité des systèmes de stockage d'énergie (condensateurs, supercondensateurs, batteries) : il est constitué de plusieurs enceintes climatiques, de moyens de caractérisation fréquentielle (spectromètre d'impédance, impédancemètre, ...) dans la gamme 10  $\mu$ Hz - 40 MHz et temporelle (banc de cyclage 30 V, 500 A) ainsi que de plates-formes de vieillissement spécifiques aux composants testés.
- Plate-forme diagnostic 45 kW pour les systèmes électriques : 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.

## Mot du (des) responsable(s)

Le groupe FDS est composé à répartition égale de 4 enseignants-chercheurs 61<sup>ème</sup> section et de 4 enseignants-chercheurs 63<sup>ème</sup> section, son spectre de compétences du Génie Electrique vers l'Automatique Discrète est donc relativement large. Faire cohabiter les membres de ce groupe autour de projets communs est un challenge que nous pensons réussir dans le cadre de cette problématique commune qu'est la Sûreté de Fonctionnement.

Pour y parvenir, FDS a besoin d'asseoir l'interaction entre les 3 axes F, D et S et également de se renforcer dans les domaines où elle est peu représentée. Ce sont les cas par exemple de l'axe fiabilité et modélisation des systèmes de stockage d'énergie électrique où actuellement seul un enseignant-chercheur traite de cette large problématique, et de l'axe diagnostic où il est nécessaire de d'appuyer nos investigations par la mise en œuvre de techniques d'observation.

Il conviendrait parallèlement de pourvoir à un poste d'enseignant-chercheur pour consolider l'interaction entre les axes diagnostic et supervision en couvrant les aspects physique et commande.

**Département**

**"Energie électrique"**

---

**Projet du département**

**Groupe "Electronique de puissance et intégration"**

**Groupe "Matériaux du génie électrique"**

## Département "Énergie électrique"

**Objectif général :** amélioration des dispositifs de transport, de distribution et de conversion de l'énergie électrique, dans un souci de protection de l'environnement : augmentation du rendement et/ou écoconception

C'est pourquoi le département cherche une meilleure connaissance du comportement des matériaux diélectriques, magnétiques et semi-conducteurs, pour l'extension de leur domaine d'utilisation en tension et en température, et pour l'intégration des convertisseurs. À un niveau plus élevé, il s'intéresse aux composants et aux systèmes nécessaires à ces objectifs.

Dans le domaine du lien Génie Électrique et Environnement, l'accent est souvent mis sur l'utilisation de sources d'énergies renouvelables pour la génération d'électricité. D'autres aspects, aussi importants, sont pris en considération au sein du département EE :

- l'étude de nouveaux matériaux, moins nocifs car plus biodégradables (huiles isolantes) ou créant moins d'effet de serre (systèmes d'isolation gazeuse remplaçant le SF6) ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique des convertisseurs, permettant des économies d'énergie ;
- la mise en place de méthodologies d'écoconception appliquées à des systèmes de conversion et de transport de l'énergie électrique ;
- le traitement des gaz polluants par plasmas froids.

## Structure et compétences du département

### Liste des personnels

Nom	Prénom	Fonc.	Étab.	HDR	Groupe	Contribution scientifique
AKA	Thomas	MCF	ECL		MGE	Physique de la décharge et Intégration diélectrique, Dépollution NOx, Foudre
ALLARD	Bruno	PU	INSA	X	EPI	Conception de systèmes intégrés basse puissance
BERGOGNE	Dominique	MCF	UCBL	2010 ?	EPI	Systèmes de puissance
BEROUAL	Abderrahmane	PU	ECL	X	MGE	Physique de la décharge, Matériaux diélectriques, Ingénierie haute tension
BREVET	Olivier	MCF	INSA		EPI	Systèmes de puissance
BROSSELDARD	Pierre	MCF	INSA		EPI	Composants haute tension
BUTTAY	Cyril	CR	INSA		EPI	<i>Packaging</i>
JOUBERT	Charles	PU	UCBL	X	EPI	Filtres passifs
LAZAR	Mihai	CR	INSA		EPI	Technologie des composants
MARTIN	Christian	MCF	UCBL		MGE	Intégration, Haute temp.
MOREL	Hervé	DR	INSA	X	EPI	Modélisation multiphysique
MOREL	Florent	MCF	ECL		EPI	CEM
MOREL	Laurent	MCF	UCBL		MGE	Instrumentation, haute temp.
PLANSON	Dominique	PU	INSA	X	EPI	Conception de composants
RAULET	Marie- Ange	MCF	UCBL		MGE	Modélisation de matériaux
RAYNAUD	Christophe	MCF	INSA	2010 ?	EPI	Caractérisation
SIXDENIER	Fabien	MCF	UCBL		MGE	Carac et modélisation matériaux
TOURNIER	Dominique	MCF	INSA	2010 ?	EPI	Intégration

### Structure du département

Le département « Énergie Électrique » (EE) est constitué de deux groupes :

- le groupe « Électronique de Puissance et Intégration » (EPI), dont les compétences incluent les dispositifs à semi-conducteurs, les convertisseurs de l'électronique de puissance, les technologies et techniques d'intégration, les condensateurs ;

- le groupe « Matériaux pour le Génie Électrique » (MGE), dont les compétences incluent la caractérisation des matériaux diélectriques et l'ingénierie haute tension d'une part et des matériaux magnétiques et leur intégration dans les dispositifs électromagnétiques d'autre part.

## Perspectives de recherche

### Contexte général

L'utilisation de l'énergie électrique, bien que déjà très répandue dans nos sociétés, est amenée à s'étendre encore plus dans les années à venir pour des raisons diverses : souplesse d'utilisation, coût maîtrisé, maintenabilité, économies d'énergies. Un exemple en est le remplacement programmé dans les avions des circuits hydrauliques par l'électricité, afin de gagner en masse, en facilité d'entretien et en possibilité d'évolution. L'utilisation de l'électricité dans les transports terrestres est aussi concernée à plusieurs niveaux : hybridation des véhicules, stockage de l'énergie, transmissions électriques... Enfin, les réseaux de transport et de distribution d'électricité sont aussi appelés à se développer pour permettre l'échange d'énergie électrique entre les nouvelles sources de production – éolienne et photovoltaïques – et les consommateurs, ce qui implique l'amélioration des ouvrages (lignes, câbles, disjoncteurs, transformateurs) en termes de fiabilité, coût, mais aussi d'impact écologique.

Dans le même temps, les contraintes fonctionnelles qui pèsent sur les éléments de transformation et de distribution de l'énergie électrique s'amplifient. On peut citer notamment comme contraintes : l'augmentation de la température de fonctionnement, l'augmentation de la tension et l'amélioration de la compacité.

Les contraintes environnementales évoluent elles-aussi, ce qui nécessite d'une part d'améliorer l'efficacité énergétique des dispositifs et, d'autre part, de minimiser les sources de pollution (produits non biodégradables, gaz à effet de serre) et de proposer des pistes d'écoconception.

### Convertisseurs haute température

L'augmentation de la température de fonctionnement est rendue nécessaire par le rapprochement - physique - des convertisseurs statiques, des actionneurs alimentés et des systèmes associés. On peut citer la proximité onduleur-actionneur-réacteur dans l'avion « plus électrique » ainsi que l'association onduleur-alternodémarrateur-moteur thermique dans l'automobile. Il est donc nécessaire de prévoir l'augmentation de la température de fonctionnement à 200°C et au-delà. Ce point concerne bien-sûr les composants à semi-conducteur, mais aussi le packaging, la connectique, les drivers et les composants passifs.

Les chercheurs du département EE sont à même de répondre à ces différents défis grâce à leurs compétences complémentaires :

- sur les composants à semi-conducteur à grand gap, la conception des puces, leur modélisation et caractérisation, ainsi que leur environnement ou packaging (groupe EPI) ;
- sur les isolants, leurs méthodes de caractérisation, la détection des défauts, l'isolation des conducteurs dans les inductances (groupe MGE) ;
- sur les condensateurs et l'amélioration de leur fiabilité (groupes EPI et MGE) ;
- sur la conception de drivers pouvant travailler à haute température, ou de drivers adaptés aux composants actifs haute température (transistor en SiC par exemple) (groupe EPI) ;
- sur les matériaux magnétiques, les modèles de comportement, leur caractérisation sous forte excitation/grande fréquence/haute température (groupe MGE).

### Ingénierie haute tension

Du fait du contexte actuel, des contraintes nouvelles sont apparues sur les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique : d'une part, l'émergence de sources renouvelables d'énergie (éolien, photovoltaïque), parfois de forte puissance, impose le renforcement des réseaux existants et le recours plus fréquent aux systèmes d'amélioration des performances des réseaux (FACTS, filtres actifs) ; d'autre part, des critères esthétiques, ou de pure faisabilité (DESERTEC, réseaux émergents en Chine ou en Inde) font que les liaisons à courant continu haute tension (HVDC) sont en fort développement.

### Coordination de l'isolement

Le département EE travaille sur différents aspects de la coordination de l'isolement haute tension, avec des recherches liées :

- aux phénomènes de décharge aux interfaces solide/gaz des appareillages haute tension (appareillage de coupure notamment) et solide/liquide (extrémités de câbles, traversées), ainsi qu'au contournement des isolateurs en présence de pollution ;

- au diagnostic de l'appareillage haute tension rempli d'huile.

### Composants et convertisseurs haute tension

La mise au point de composants actifs pouvant travailler à haute tension est également en cours et se développera. Cette perspective est conduite au sein du département EE grâce aux compétences présentes dans le groupe EPI sur les composants à semi-conducteur à grand gap. Une puce nue tenant une forte tension ne suffit pas à obtenir un composant actif haute tension. Les problèmes de tenue de la passivation et du packaging croissent en effet d'autant plus que le niveau de tension augmente. La collaboration avec le groupe MGE est naturelle afin de mettre au point les composants actifs voire les modules de puissance à haute tension désirés.

### Intégration en électronique de puissance

Le concept d'intégration en électronique de puissance vient de plusieurs besoins concomitants, parmi lesquels on peut citer : la diminution du volume des convertisseurs, l'intégration fonctionnelle (un même ensemble gère plusieurs fonctions), l'augmentation de la fiabilité par maîtrise des connexions, l'amélioration de la CEM par optimisation du placement des éléments et des conducteurs. Cette thématique est fortement présente dans le GDR SEEDS. Elle trouve naturellement sa place au sein du département EE à travers différentes pistes de recherche :

- la conception, réalisation, caractérisation et utilisation de puces, avec pour objectifs :
  - l'intégration monolithique (convertisseur sur un seul substrat semi-conducteur), qui nécessite les compétences pointues des membres du groupe EPI pour les phases de conception ;
  - l'intégration hybride où dominent les problèmes liés aux reports, connectique et passivation. L'ensemble des compétences du département doit être mobilisé, que ce soit pour la partie procédés technologiques ou pour compatibilité entre les différents matériaux ;
  - l'augmentation de la densité de puissance, qui passe sans doute par l'utilisation de composants à semi-conducteur à grand gap, spécificité du groupe EPI.
- la création de nouveaux composants passifs, ou d'assemblages de composants passifs avec pour objectifs :
  - la réalisation de composants de filtrage (notamment inductances) de très petite taille, travaillant à des fréquences de l'ordre de 100MHz, qui constitue une étape clef pour la mise en oeuvre de mini convertisseurs intégrés. Les compétences présentes concernent à la fois les caractéristiques des matériaux et les étapes de fabrication particulières, nécessaires par exemple pour la création de pistes conductrices ;
  - L'optimisation du placement des composants et du routage des pistes, afin d'améliorer l'aspect CEM des convertisseurs. Ce thème de recherche possède des liens évidents avec le groupe « conception » (C. Voltaire).

### Caractérisation et modélisation des matériaux du Génie Électrique

L'amélioration des performances des composants et systèmes passe par une meilleure connaissance des matériaux, de leur comportement et de leurs défauts (pertes, claquage, limites d'utilisation en fréquence...). Les recherches menées au sein du département dans ce domaine comprennent :

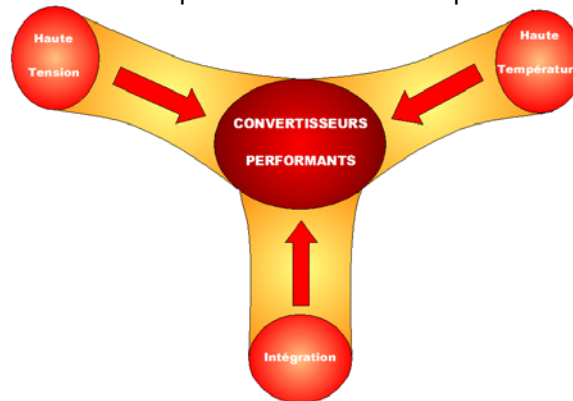
- la caractérisation des matériaux magnétiques, notamment « in situ », qui devrait permettre de relever localement le cycle d'hystérésis de matériaux. Cette activité de caractérisation alimente la base de données sur les matériaux magnétiques, créée au sein du groupe MGE ;
- la modélisation du comportement temporel des matériaux magnétiques, éventuellement en fonction de la température, ainsi que l'identification paramétrique des modèles obtenus ;
- l'aide à la conception de systèmes à base de matériaux magnétiques (capteurs, actionneurs...), au choix de matériaux, au dimensionnement, à travers notamment le développement du logiciel Reluctool ;
- la modélisation des décharges dans les liquides, les gaz, en particulier aux interfaces, ainsi que la recherche de la dimension fractale caractérisant les décharges glissantes ;
- le développement de modèles prédictifs de décharge de foudre et de décharge dans les grands intervalles d'air.

## Groupe "Électronique de Puissance et Intégration"

**Objectif général** : amélioration des convertisseurs statiques de l'énergie électrique : amélioration de l'efficacité énergétique, augmentation de la tenue en tension, fonctionnement à de plus hautes températures ambiantes, diminution de l'encombrement et du coût, réduction des perturbations électromagnétiques et du volume...

Ces actions peuvent être réparties selon trois grands axes de recherches :

- **Haute tension** Des avancées dans ce domaine sont nécessaires pour l'amélioration du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- **Haute température** La principale application visée pour le fonctionnement de convertisseurs d'électronique de puissance à haute température concerne les véhicules « plus électriques » (véhicules terrestres, ferroviaires, aériens et spatiaux).
- **Intégration** Ceci recouvre l'intégration du composant au système en considérant les contraintes applicatives (matériaux, modules...). Les principales applications visées concernent les systèmes embarqués et nomades ainsi que l'habitat.



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

### Structure et compétences du groupe

#### Structure du groupe

L'objectif scientifique unique du groupe vise à améliorer les performances des convertisseurs. Trois axes de recherche sont identifiés, mais fortement imbriqués. C'est pourquoi il ne nous a pas paru pertinent d'en cloisonner les membres dans différents groupes de travail. Cependant les collaborations entre les personnes sont omniprésentes à travers les nombreux projets en cours et naissant.

#### Compétences du groupe

Le spectre des compétences des membres du groupe est très vaste mais cohérent. Celui-ci va des matériaux semiconducteurs et leurs procédés technologiques jusqu'aux systèmes en passant par la physique des dispositifs à semiconducteur. Dans la liste suivante, on détaille ces compétences classées selon une approche *bottom-up* :

- analyse de matériaux semiconducteurs et matériaux de packaging ;
- procédés technologiques des composants (étapes élémentaires, diagramme de cheminement, masques) ;
- identification expérimentale des paramètres des matériaux nécessaires pour la simulation ;
- conception de composants en adéquation avec la technologie et le matériau ;
- caractérisation électrique dans de larges plages de courant et tension, dans des ambiances contrôlées (milieu gaz, liquide, solide et température) pour des composants packagés ou non ;

- modélisation analytique avec validation expérimentale des composants et des systèmes de puissance de façon relativement indépendante des plateformes et langages de simulation ;
- conception et validation de drivers spécifiques de composants de puissance (haute tension, haute température) ;
- packaging de composants pour la haute température et la haute tension ;
- fiabilité des composants et des systèmes, test de condensateurs et inductances ;
- CEM et intégration ;
- filtrage pour les convertisseurs haute température ;
- gestion de l'énergie dans les circuits intégrés (stratégie de commande, récupération énergie).

## Perspectives de recherche

### Contexte

L'électronique de puissance (EP) est une technologie clé pour le développement durable, car elle permet d'améliorer le rendement global des systèmes : 80% de l'énergie électrique sera ainsi gérée par l'EP dans un avenir proche. De plus, l'électronique de puissance permet une grande souplesse d'utilisation de l'énergie électrique (vitesse variable, adaptation entre réseaux, etc.), ce qui explique que la part de cette énergie soit en augmentation croissante aux dépens des énergies fossiles. En 2040, on prévoit ainsi que près de la moitié (48%) de l'énergie totale consommée sera gérée par des systèmes d'électronique de puissance<sup>1</sup>.

L'électronique de puissance peut également fournir des solutions aux attentes de la société, par exemple pour améliorer les véhicules hybrides et électriques, l'autonomie des systèmes nomades, et pour tendre vers une transparence des systèmes comme les chargeurs de batterie (réduction de leur taille, de leur masse, de leur coût et de leur impact écologique). Le développement des sources d'énergie renouvelables nécessite également de nouveaux convertisseurs pour les connecter au réseau électrique.

Aux niveaux international, national, comme au niveau régional, de nombreux industriels et institutionnels expriment des besoins en EP dans les domaines des transports, de la distribution de l'énergie et de l'armement.

### Objectifs

Les objectifs chiffrés du groupe pour la fin du futur quadriennal se déclinent selon les trois axes suivants :

#### Électronique de puissance haute tension

Développement de protections périphériques et de l'environnement rapproché (package) capables de tenir une tension de 15 kV, alors qu'actuellement, la tenue en tension maximale est de 7,2 kV. Au niveau système, nous visons des convertisseurs 30 kV pour des applications directement reliées au réseau électrique dit « moyenne tension ». Premiers convertisseurs utilisant des composants haute tension (10 kV et plus).

#### Électronique de puissance haute température

Conception de convertisseurs fonctionnant à température élevée (température ambiante 200 à 300°C). Les puces de puissance en carbure de silicium fonctionnant sans (trop) de problèmes dans cet environnement. L'essentiel de notre activité portera sur les éléments périphériques et sur la conception des circuits de commande (driver) haute température avec des matériaux semiconducteurs à grand gap, qui n'existent pas à l'heure actuelle ; de structures de filtrage; de solutions d'assemblage et de refroidissement (packaging). Ces dernières devront, en plus des hautes températures, supporter les contraintes mécaniques imposées par les brusques variations de température (chocs thermiques).

#### Intégration de puissance et gestion d'énergie dans les circuits intégrés

Sur le plan domotique (habitat), l'objectif est de concevoir un convertisseur monolithique 600V, 10A. Celui-ci présentera l'avantage d'avoir une taille extrêmement réduite. Il devra inclure des protections

<sup>1</sup> Source : « Power Electronics : technologies and global markets »  
[http://www.electronics.ca/reports/power\\_energy/utility\\_power\\_electronics.html](http://www.electronics.ca/reports/power_energy/utility_power_electronics.html)

(surtension, surcourant, détection de polarité). Actuellement, nous avons des composants unitaires réalisés sur des substrats séparés.

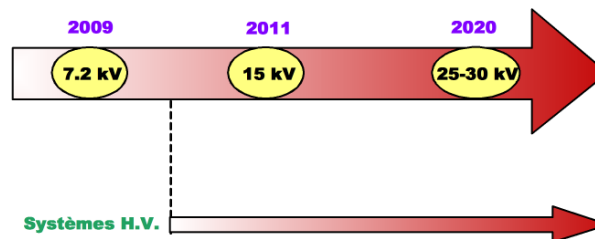
Un autre objectif est d'obtenir un convertisseur de puissance ayant une densité de puissance volumique de plus de 10 kW/l (le meilleur démonstrateur actuel présente une densité de puissance de 5.8 kW/l). L'utilisation de nouveaux matériaux semiconducteurs (SiC, GaN) doit permettre de réduire considérablement les pertes dans les composants ainsi qu'une augmentation des fréquences de fonctionnement. Ces bénéfices se traduiront par une diminution de la taille des composants passifs, et par conséquent par une augmentation des densités volumiques de puissance des convertisseurs.

L'activité liée aux circuits intégrés doit aboutir à la validation expérimentale à 250°C de l'étage de commande rapprochée (driver) du composant JFET SiC. Cette étape ultime de plusieurs projets naissants adresse des défis méthodologiques, techniques et technologiques. L'objectif étant d'intégrer la commande rapprochée et la logique de commande avec du matériau grand gap.

En termes de circuits intégrés silicium et de gestion d'énergie, un objectif concerne la barrière des 500 MHz de fréquence de découpage pour les actionneurs enfouis des systèmes nomades, gérant l'énergie en temps réel au plus près des besoins. La commande digitale constitue un des enjeux du futur quadriennal. Le rapprochement dans le boîtier ou sur le cristal des éléments passifs est un second enjeu, toujours pour les hautes fréquences de découpage. Les démonstrateurs concerneront les mémoires, composants énergivores et les blocs de communication série à très haut débit (100Gb/s), verrous techniques actuels.

## Perspectives, défis relevés et verrous adressés

### D1 - Électronique de puissance haute tension



### D11 - Packaging haute tension

Actuellement, la tenue en tension des puces semiconductrices est entièrement assurée par des structures réalisées sur leur surface. Du fait de l'augmentation des tensions de fonctionnement, ces structures finissent par occuper une grande place au sein de la puce. Les deux orientations suivies sont donc tout d'abord d'améliorer ces structures pour qu'elles supportent des tensions plus importantes (en occupant le minimum de place), et ensuite de concevoir des solutions dans lesquelles l'environnement proche de la puce (le *packaging*) assure une partie de la tenue en tension (étalement des lignes de champ à l'extérieur de la puce).

### D12 - Conception et caractérisation composants

La conception des composants nécessite la prise en compte de l'environnement rapproché du semiconducteur qui pourra être solide, liquide ou gazeux dans des boîtiers spécifiques. De nouvelles techniques et/ou des combinaisons de solutions existantes de protections périphériques tenant compte de l'environnement et de leur faisabilité technologique sont à développer.

La caractérisation des composants de puissance est une tâche indispensable, pour laquelle le groupe possède un savoir faire important notamment pour les mesures  $i(v)$ ,  $c(v)$  et en commutation. Toutefois, la mesure des commutations en haute tension pose de nombreux nouveaux problèmes : mesure de haute tension ( $> 5kV$ ) variant rapidement, aggravation des problèmes de perturbations électromagnétiques, fin de validité du modèle de la cellule de commutation ...

Une enceinte sous vide permettant d'effectuer des mesures sous pointe de composants sur tranche de la température ambiante jusqu'à 800°C est en cours d'adaptation vis-à-vis de la montée en tension : elle est actuellement limitée à environ 1 kV par la nature des passages de câble. Cet équipement devrait aussi permettre d'effectuer les mesures sous un environnement gazeux déterminé, mais dans ce cas, il ne sera plus possible de monter à de si hautes températures. Cette enceinte viendra compléter les moyens déjà disponibles : une alimentation haute tension 12,5 kV, plusieurs appareils « Sourcemeter », permettant des mesures du pA à 0,1 A jusqu'à 1,1 kV. Le verrou actuel est de trouver et ou réaliser des passages de câble haute tension supportant un vide de  $10^{-6}$  mbar.

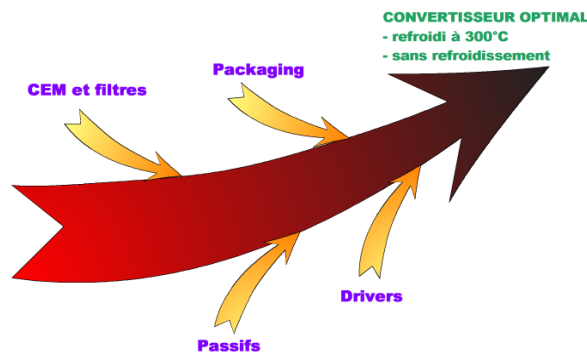
Le banc d'OBIC est en cours d'adaptation pour permettre d'effectuer des mesures à plus haute température (jusqu'à 100 ou 150°C) ; il devrait aussi évoluer dans le sens de la montée en tension

(3 kV au lieu de 1,1 kV actuellement). Cela nécessitera également une adaptation logicielle. Pour mémoire, l'OBIC (Optical Beam Induced Current) est une technique de mesure non destructive permettant la localisation des zones de charge d'espace en surface dans le dispositif à semiconducteur (le plus souvent une diode Schottky ou bipolaire) ainsi que la détermination des coefficients d'ionisation. Cette technique utilise un laser UV pour créer des paires électron-trou dans le composant. Si ces paires sont créées dans une zone de charge d'espace, elles sont alors séparées par le champ électrique et un amplificateur à détection synchrone permet de mesurer le courant alors recueilli aux électrodes. Une détermination expérimentale précise de ces coefficients permet d'affiner les calculs de tenue en tension effectuée par les logiciels de simulation tels que Medici ou Sentaurus.

### **D13 - Commande des composants, systèmes haute tension.**

Pour des composants unitaires haute tension à semiconducteur grand gap, nous souhaitons développer une commande optique. Étant donné les niveaux de tension pour ces applications (30 kV), l'isolation optique est une bonne alternative sur laquelle nous travaillons d'ores et déjà.

### **D2 - Électronique de puissance haute température**



### **D21 - Mise en œuvre des composants, systèmes**

Selon la tension, la fréquence et la température de l'application visée, le type de composant (unipolaires pour les JFET ou bipolaires pour les transistors et thyristors) le plus adapté devra être déterminé.

Différentes topologies de convertisseurs seront étudiées avec l'objectif d'obtenir le meilleur rendement.

### **D22 - Packaging**

Le packaging constitue à l'heure actuelle le talon d'Achille des composants de puissance : chargé d'assurer l'isolation électrique, le refroidissement et la tenue mécanique, il s'avère peu robuste face au vieillissement et au cyclage thermique. Les solutions actuelles, à peine satisfaisantes, deviennent totalement inadaptées aux applications « haute température ». Les principaux points auxquels nous nous intéresserons sont les attaches de puces (solutions alternatives aux brasures), les substrats isolants (très sensibles au cyclage thermique) et la prise de contact sur les puces (solutions de remplacement aux fils de *bonding*).

### **D23 - Filtres**

La réalisation de convertisseurs travaillant à haute température (200°C et au-delà) implique l'existence de filtres et donc de composants passifs (inductances, condensateurs) pouvant supporter des températures élevées. Un certain nombre de projets de recherche peuvent se dégager de ce constat :

- pour les composants magnétiques : la caractérisation des matériaux magnétiques à haute température et l'élaboration de modèles de comportement afin de choisir le noyau le plus apte à réaliser les composants inductifs. Des collaborations sont envisagées avec le groupe « Matériaux pour le génie électrique », ainsi qu'avec d'autres laboratoires français tels que le G2ELab
- pour les composants capacitifs : le choix de condensateurs (film et céramique notamment) susceptibles de travailler dans des ambiances chaudes. Ce choix doit être effectué à partir de l'expérience des membres du groupe EPI dans le domaine de la modélisation des composants passifs, notamment concernant la répartition du courant et des échauffements, ainsi que des causes de défaillance des condensateurs. Il est aussi envisagé le développement de moyens de test pertinents pour les températures et les environnements considérés. Les collaborations sont envisagées avec le groupe FDS et le laboratoire IMS

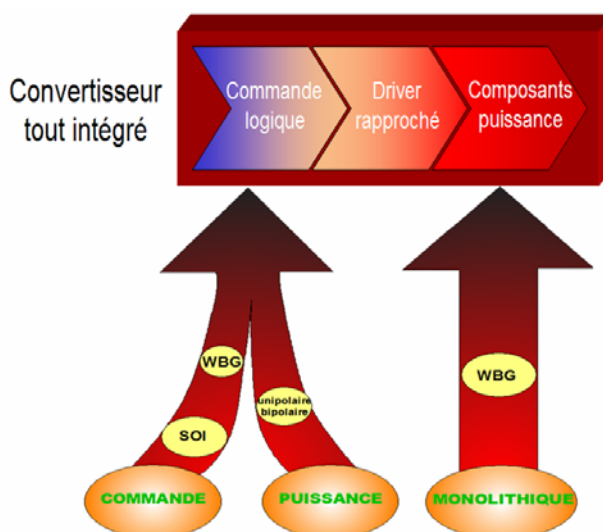
- pour la structure d'ensemble des filtres : l'étude de topologies de filtres et du placement relatif des composants permettant à la fois d'améliorer l'efficacité (CEM) et de limiter les échauffements entre composants. Il est aussi envisagé de travailler sur les aspects technologiques de la connectique pour un fonctionnement qui limite les contraintes de cyclage et qui améliore la compacité des dispositifs. Des collaborations avec le groupe « Modélisation, analyse, conception et commande de systèmes » sont envisagées.

#### **D24 -Caractérisation**

L'enceinte sous vide utilisée pour la caractérisation « haute tension » de composants est également prévue pour fonctionner à de plus hautes températures grâce à la mise en place progressive de platines spécifiques.

Le comportement des différents éléments de composants packagés (puce semiconductrice, systèmes de prise de contact telles que brasure, bondings..., DCB) va être étudié dans cette enceinte permettant de les porter à des températures jusqu'à 450°C de façon prolongée. Des cyclages haute température/basse température seront effectués afin d'étudier le comportement dans le temps du composant packagé. Le composant pourra être en fonctionnement électrique ou non pendant ces cyclages (cyclage passif ou cyclage actif).

#### **D3 - Intégration de puissance et gestion d'énergie dans les ICs**



#### **D31 - Convertisseurs monolithiques (puissance < 1 kW)**

Afin d'améliorer les performances des convertisseurs, un travail important doit être conduit sur la conception des composants (architecture et topologie des convertisseurs) en utilisant des méthodes technologiques innovantes (dopage, prise de contacts, isolation galvanique). Ces nouvelles technologies seront développées en prenant en compte les spécificités du semiconducteur et de son environnement, ceci nécessitant une approche matériaux pour comprendre les phénomènes physico-chimiques et électriques qui limitent les performances des composants.

#### **D32 - Module de puissance et fonctions spécifiques**

Les propriétés des matériaux grand gap permettent d'envisager la réalisation de fonctions innovantes (composants bidirectionnels, protections série et parallèle). Ces fonctions sont des briques de base pour les modules de puissance compacts. Il est nécessaire de développer des interconnexions innovantes (micropoteaux, sandwich, collage) afin d'augmenter la densité volumique de puissance.

#### **D33 -Circuits intégrés**

Dans le contexte de l'électronique haute température (400°C), le point faible est l'étage de commande. Il est nécessaire de développer des circuits intégrés capables de générer les lois de commande proches des composants de puissance. Les fonctions logiques élémentaires seront réalisées en utilisant du matériau semiconducteur à grand gap (SiC, GaN). Leurs performances seront évaluées en fonction de la température et la fréquence.

#### **D34 - CEM**

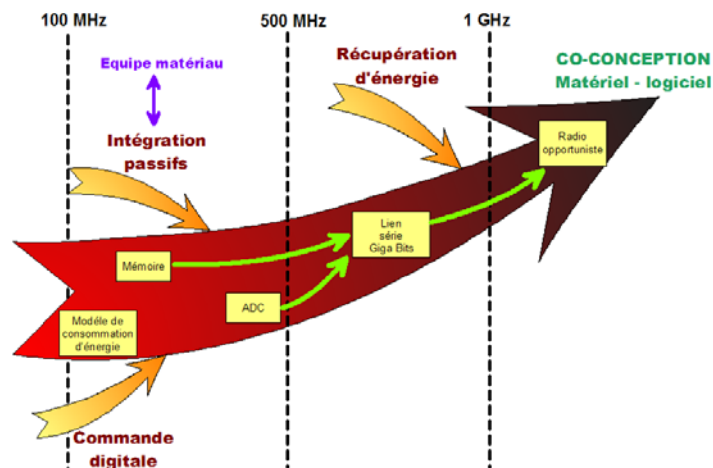
Les interrupteurs de puissance développés au sein du groupe conduisent notamment à des commutations plus rapides et à un fonctionnement possible à de plus hautes températures. Ces

conditions de fonctionnement posent de nouveaux problèmes du point de vue de la compatibilité électromagnétique.

D'une part, la rapidité accrue des commutations conduit à des champs rayonnés et à des formes d'ondes (tensions de mode commun ou de mode différentiel, courants...) chargés d'harmoniques à de plus hautes fréquences. Ceci engendre de nouvelles contraintes pour la conception des filtres et des blindages et constitue un frein à l'intégration de circuits "bas niveaux" au plus près des interrupteurs de puissance. Actuellement, la solution adoptée consiste à volontairement ralentir les commutations au détriment du rendement du convertisseur. Nous chercherons donc à comprendre et prédire la topologie et l'intensité du champ rayonné par les composants et les conducteurs afin de placer les circuits sensibles au plus près des composants de puissance tout en évitant des dysfonctionnements. D'autre part, si le fonctionnement à hautes températures (jusqu'à 300°C) des composants d'électronique de puissance est doré et déjà démontré, des études sont en cours pour quantifier les performances des filtres à ces températures. Il est clair que ces dernières sont dégradées lorsque la température augmente. Une méthode de dimensionnement de filtre prenant en compte les évolutions en fonction de la température à la fois des caractéristiques des composants passifs et actifs reste à développer. Ce travail donnera lieu à des collaborations avec le groupe « Matériaux pour le génie électrique ».

### **D35 - Gestion d'énergie**

La gestion d'énergie au sein des circuits intégrés recouvre deux types de défis. Du point de vue matériel, des verrous empêchent l'intégration transparente des régulateurs de tension (commande, composants passifs) et l'augmentation de leur bande passante de régulation (GHz). Des verrous méthodologiques limitent l'utilisation pertinente de ces IPs de gestion d'énergie en relation avec le développement logiciel. La notion de modèle de consommation occupe de nombreuses équipes de recherche et constitue le premier écueil. L'utilisation de plateforme comme *SoClib* peut permettre ensuite de déployer des méthodologies d'optimisation de plateforme de systèmes embarqués sous contrainte de consommation énergétique à qualité de service donnée.



### **Pertinence des perspectives et positionnement**

#### **Électronique de puissance haute tension**

La tenue en tension des composants de puissance est un sujet essentiel sur lequel le groupe travaille depuis de nombreuses années. L'environnement du semiconducteur est étudié en collaboration au niveau national avec le Laplace (et nous avons obtenu une tenue en tension supérieure à 7 kV en 2008). Une autre facette concerne la tenue en tension des composants de puissance en SiC pour les applications d'électronique impulsionnelle, et nous travaillons depuis plus de dix ans avec l'Institut Saint-Louis (ISL) sur les composants du futur pour le lanceur électrique. Le thyristor est le composant de choix pour cette application et nous avons obtenu une tenue en tension de près de 5 kV en 2003, qui était un record mondial. Nous avons actuellement un contrat ANR sur les composants 10 et 15 kV dans lequel le CNM de Barcelone doit réaliser les structures optimisées à Ampère. Ces composants devraient être pertinents pour les applications de distribution électrique et un bon support pour des passivations innovantes en partenariat avec nos collaborateurs nationaux et internationaux.

## Électronique de puissance haute température

Cette activité (de même que celle portant sur la haute tension), découle naturellement des travaux sur les composants en carbure de silicium réalisés au laboratoire depuis plus d'une dizaine d'années. Avec l'apparition de tels composants au niveau industriel, il est devenu évident que l'électronique haute température était théoriquement possible, mais que sa mise en œuvre pratique se heurtait à de nombreux verrous. Cette vision est partagée par la communauté scientifique, tant industrielle qu'universitaire.

Au niveau national, nos collaborations avec la plupart des acteurs de recherche français font que nos sujets d'étude (notamment en matière de driver, packaging, filtrage) sont complémentaires des leurs. Au niveau international, les résultats que nous avons présentés (par exemple un onduleur fonctionnel à 200°C ambiants, ou la modélisation électrothermique du JFET) sont d'un niveau comparable à ceux des meilleures équipes américaines ou européennes.

## Intégration de puissance et gestion d'énergie dans les ICs

Cette activité s'inscrit dans le périmètre des GdR SEEDS (pôle ISP3D) et GdR SiP/SoC. Animateur du pôle ISP3D depuis plusieurs années, le groupe a également pris un rôle moteur au sein des thématiques collaboratives du GdR SiP/SoC (gestion d'énergie). Le groupe collabore avec les principaux laboratoires nationaux dans la limite des confidentialités imposées par les partenaires industriels, incontournables vis-à-vis de la technologie. La concurrence des laboratoires internationaux se mesure à la succession des publications mais n'a pas encore conduit à des situations de partenariat. Là encore, les contraintes liées au partenariat industriel sont très fortes. On notera le partenariat naissant avec l'Université de Saarbrücken sur les circuits électroniques rapides.

## Dimensions sociétales des perspectives

L'intérêt de l'électronique de puissance en général et des thèmes de recherche développés au sein du groupe en particulier pour l'environnement, les transports, les systèmes embarqués et nomades, la distribution de l'énergie ou l'armement ont été développés dans la partie « contexte » des « Perspectives de recherche ». C'est donc l'aspect « formation » qui est exposé dans cette partie.

Des membres du groupe enseignant en Master2 et le groupe en général accueillent chaque année des stagiaires de Master2. Une réflexion sera menée au sein du groupe afin d'inciter plus d'étudiants des établissements de tutelle à s'inscrire dans les Master2 liés à nos activités (en double cursus pour les écoles d'ingénieurs). Pour ce faire, il sera nécessaire d'envisager de rémunérer les stages en laboratoire et d'inciter nos partenaires industriels à proposer davantage de sujet touchant à nos activités de recherche.

Deux membres du groupe sont impliqués dans la création d'un master de recherche international au Liban avec comme objectifs d'une part de contribuer au transfert de connaissances vers ce pays, et d'autre part de repérer les meilleurs étudiants pour leur proposer des stages de master et/ou des sujets de thèse au sein du groupe.

Enfin, l'électronique de puissance est enseignée au sein des trois établissements de tutelle. Une réflexion sera menée au sein du groupe ou du département « Energie Electrique » afin de mettre à profit la complémentarité des membres du groupe et du département, en mutualisant par exemple les supports de formation.

## Collaborations envisagées

- Electronique de puissance haute tension : ISL, DGA, ALSTOM voire AREVA
- Electronique de puissance haute température : SAFRAN, G2ELab, IMS, Université de Nottingham, ETH Zürich
- Intégration de puissance et gestion d'énergie dans les ICs : CNM, CEA-LETI, ADENEO, 3DPHI, STMicroelectronics, CITI, Université Saarbrücken.

## Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet

### Électronique de puissance haute tension

*Cryostat haute tension* : il est en cours d'installation : reste à modifier le passage des câbles pour la haute tension.

*Salle spécifique pour les essais haute tension* : les normes imposent des conditions de sécurité drastiques. Il est impératif de séparer physiquement l'expérimentateur du banc de mesure présentant des éléments sous haute tension non protégés d'un contact humain accidentel, comme cela peut être

le cas pour le test de composants sous pointe. Il est impératif de disposer d'une salle dédiée aux mesures haute tension pour *limiter les risques d'accident*.

### Électronique de puissance haute température

*Salle « packaging »* : les procédés utilisés (attaques chimiques, électrodéposition, sérigraphie, lithographie...) nécessitent un environnement contrôlé (salle blanche, paillasse adaptées), mais sont difficilement compatibles avec des salles blanches « microélectronique », aux normes plus contraignantes. Une salle du laboratoire va donc être équipée pour réaliser ces étapes spécifiques.

*Enceintes de caractérisation, de cyclage, et de vieillissement* : ensemble d'équipements permettant d'étendre nos capacités de caractérisation électrique haute température. Il faut cependant noter qu'en matière de cyclage, nous ne cherchons qu'à pouvoir effectuer des tests préliminaires, d'autres laboratoires nationaux (INRETS-LTN ou IMS) disposant de moyens et d'expertise bien supérieurs.

*Banc automatisé pour test sur puce* : une station sous pointe (prober) semi-automatique permettrait d'effectuer des mesures, associée aux instruments adéquats, sur un grand nombre de dispositifs. Cela permettrait d'une part de réaliser des cartographies sur des wafers complets avec des corrélations possibles avec la localisation des défauts sur le wafer, d'autre part de mettre en oeuvre des analyses statistiques des performances des composants. La mise en fonction de ce banc automatique de mesure va nécessiter un important travail de programmation.

*Alimentations et onduleurs* : ces équipements seront nécessaires pour le test de filtres de puissance.

### Intégration de puissance et gestion d'énergie dans les ICs

S'agissant d'actions de recherche dont la validation expérimentale passe par des échantillons intégrés, les moyens nécessaires concernent l'accès à une technologie mature sur la durée des projets. Les moyens lourds de caractérisation liés au niveau de fréquence mis en jeu et le niveau moyen faible des énergies transmises obligent à constituer un réseau de partenaires scientifiques.

### Recrutement

L'accroissement du nombre de circuits proposés à la fabrication ainsi que leurs platines de test spécifiques dépassent la capacité des 2 personnels techniques qui peuvent être mobilisés en support du groupe. Un poste d'IR ou IE prend naturellement son sens dès lors que le pilotage de la recherche par projet a multiplié les objectifs de démonstrateur. La pluralité des technologies mises en oeuvre au sein du groupe ajoute à cette pression puisque les compétences doivent être distribuées pour pouvoir être maintenues à un haut niveau.

Dans le but d'atteindre nos différents objectifs, nous serons contraints de réaliser de plus en plus fréquemment des prototypes en SiC et nous avons donc besoin de personnel technique pour pérenniser la filière « SiC » à Lyon (Plate-forme Nanolyon). Aussi est-il nécessaire qu'un Ingénieur d'Etude ou un Ingénieur de Recherche soit recruté. Ses activités devront à plus de 50% être consacrées à la réalisation de composants en SiC en salle blanche, avec une maîtrise des moyens technologiques qui sont mis à notre disposition (lithographie, dépôt de couches minces par évaporation et pulvérisation, PECVD, gravure humide avec des solutions chimiques, gravure sèche par des techniques plasmas RIE - ICP) et d'analyse et observation des échantillons (profilométrie, microscopies optique et électronique à balayage). Une formation physico-chimique des matériaux est souhaitable.

### Mot du (des) responsable(s)

Le groupe EPI s'attelle à des questions scientifiques et à des projets à forte cohérence. Il apparaît clairement dans le bilan que le poids et l'enjeu de l'électronique de puissance vont s'accroître dans les systèmes où l'efficacité énergétique est primordiale, ce qui aura pour conséquence d'augmenter le nombre de contrats de recherche et aussi de donner la possibilité d'étudier des sujets porteurs.

Jusqu'à présent, le groupe a réussi à gérer une forte pression industrielle tout en maintenant des objectifs scientifiques clairs et identifiés. La pluralité des compétences nécessaires à cette cohérence se double d'une très forte implication de la part de chacun des membres du groupe. Sans recrutement et promotion interne, il ne sera pas possible de maintenir l'efficacité du groupe ni son soutien technique. Enfin, des détails importants de disponibilités de locaux peuvent limiter les développements expérimentaux.

## Groupe "Matériaux pour le Génie électrique"

**Objectif général** : L'équipe Matériaux pour le Génie Electrique a pour objectif l'approfondissement des connaissances sur les phénomènes dans les matériaux, actuels et nouveaux, leur caractérisation et leur modélisation en vue de leur mise en œuvre dans les matériels et systèmes du génie électrique, dans des conditions optimisées et compatibles avec l'environnement.

**Mots-clef** : diélectriques–magnétiques-composites, caractérisation expérimentale, modélisation, hystérésis dynamique, préclaquage et claquage diélectrique, foudre, ingénierie haute tension, dépollution, matériaux écologiques et éco-conception.

### Structure et compétences du groupe

#### Structure du groupe

Les activités du groupe portent sur les études de matériaux en vue de leurs utilisations dans les systèmes du génie électrique. Elles s'appuient sur les compétences développées au travers deux thèmes principaux :

- Matériaux et circuits magnétiques
- Matériaux diélectriques et ingénierie haute tension

#### Compétences du groupe

Le groupe dispose de compétences avérées dans les domaines de la caractérisation expérimentale des matériaux, de leur modélisation et de leur mise en œuvre dans les dispositifs du génie électrique. Plus précisément, l'équipe dispose de compétences dans le domaine :

- des méthodes de caractérisation globales et locales des propriétés des matériaux magnétiques et plus particulièrement vis à vis du comportement fréquentiel, temporel et en température, de leur modélisation et de l'implantation de ces modèles dans des logiciels de simulation et/ou de conception ;
- de la physique de la décharge (préclaquage et claquage dans les matériaux, décharges aux interfaces solide/fluide ...), de l'élaboration de modèles prédictifs de décharges (liquides, gaz, interfaces, longue décharge et foudre), du diagnostic sur l'appareillage haute et moyenne tensions en particulier, et de l'ingénierie haute tension.

### Perspectives de recherche

#### Contexte

Comme dans d'autres domaines, c'est d'abord le comportement des matériaux qui est à la base des performances des matériels et systèmes électriques : la tendance actuelle est à « toujours plus » de performances (en tension, courant, fréquence, température) avec « toujours moins » (de volume, de coût, de pollution, de maintenance). Notre objectif est l'approfondissement des connaissances sur les phénomènes dans les matériaux traditionnels, nouveaux et innovants, leur caractérisation et leur modélisation en vue d'optimiser leur intégration dans les systèmes électriques.

#### Objectif

La bonne connaissance du comportement des matériaux est un enjeu majeur pour le fonctionnement des systèmes dans leur environnement. Le groupe « Matériaux pour le Génie Electrique » a pour objectif de mener des recherches pouvant 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 des actions intégration, modélisation de matériaux composites, conception de composants et systèmes et éco-conception. Le groupe poursuivra ses recherches sur des thèmes novateurs comme :

- Le développement de dispositifs pour des applications fonctionnant sous des contraintes de températures élevées ; les actions menées actuellement pour atteindre 200°C devront être portées à 400°C.
- La recherche de matériaux répondant aux exigences et chartes sur l'environnement : recherche de gaz à effet de serre réduit en remplacement du SF6 et recherche de nouveaux liquides (huiles végétales) pour remplacer les huiles minérales et synthétiques.

Pour atteindre ces objectifs, des méthodes et outils de caractérisation ainsi que des modèles devront être développés.

## Perspectives, défis relevés et verrous adressés

Le groupe « Matériaux pour le Génie Electrique » mène et mènera des recherches dans des domaines où elle apparaît parmi les leaders. Ses travaux portent sur des actions communes mettant en œuvre les compétences sur les matériaux tant magnétiques que diélectriques ainsi que sur des actions spécifiques :

### 1. Matériaux et composants magnétiques

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 et sera étudiée. Toutes ces modifications de propriétés sont modélisées de manière à pouvoir implanter ces modèles dans des logiciels de simulation ou de conception. Dans chaque compétence, évoquée plus haut, plusieurs perspectives sont envisagées :

#### 1.1 Caractérisation de matériaux/circuits magnétiques

- **Caractérisation magnétique locale in situ.** Il s'agit d'utiliser la technique des « pointes » pour la mesure de l'induction **B** et une « H coil » pour la mesure de l'excitation **H**. Ce type de capteur permet de relever localement le cycle d'hystérésis d'un matériau permettant ainsi de revenir aux pertes magnétiques locales dans une géométrie complexe et d'en obtenir une cartographie. L'utilisation d'une caméra infra-rouge pour le relevé de l'évolution de la température dans un système soumis à un champ magnétique, permettra de corrélérer ces résultats.
- **Caractérisation magnétique à température élevée.** Pour reprendre les mots du contexte, la tendance actuelle est à « toujours plus » de performances (en tension, courant, fréquence, température) avec « toujours moins » (de volume, de coût, de pollution, de maintenance). Cela amène les systèmes du génie électrique à travailler en environnement contraint. Pour pouvoir prédire les performances de ces systèmes contraints, il est nécessaire d'évaluer le comportement en service des matériaux qui les constituent. Afin d'étudier le comportement des matériaux magnétiques en fonction de la température, un banc de caractérisation à haute température est en cours de développement. Un four à haute température (800°C) à atmosphère contrôlée est déjà en place.
- **Base de données de matériaux (Magathèque).** Pour pérenniser les données des divers matériaux testés au laboratoire, une base de données a été créée. Nous poursuivons son développement, de manière à ce qu'elle soit encore plus ouverte vers l'extérieur et utilisée par le plus grand nombre de personnes. Celle-ci permet de stocker des mesures, ainsi que diverses données concernant le matériau et les paramètres de divers 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. Cette plateforme est accessible par le web (connexion par login et mot de passe). Le logiciel Reluctool (développé par la société 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.

#### 1.2 Modélisation comportementale de matériaux

- **Modélisation du comportement temporel.** Nous poursuivons cette action dans le même esprit que celui des deux modèles de comportement dynamique de matériau (et de circuit) élaborés par le laboratoire (Dynamic & Static Feedback et Diffusion & Wall Motion models) afin d'arriver à 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 ou améliorés (modèle de la dérivée, modèle de Jiles Atherton modifié pour représenter les cycles mineurs 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. Elle permettra de représenter des régimes transitoires de circuits.
- **Identification de paramètres de modèles comportementaux.** L'identification de paramètres associés aux modèles développés ou à d'autres modèles empruntés à la littérature 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. Ces travaux d'optimisation que nous poursuivrons dans les années qui viennent, constitueront un outil précieux permettant de compléter la base de données citée plus haut. Notre objectif est de trouver les paramètres des modèles ou des caractéristiques physiques de manière automatique et sans a priori, d'identifier les corrélations entre différents paramètres et de définir les bons critères.

- **Modélisation du comportement dynamique des matériaux magnétiques en fonction de la température** . Grâce aux méthodes d'optimisation citées plus haut, nous avons pu réutiliser les modèles existants (DSF & DWM) pour identifier des paramètres en fonction de différentes températures. Ceci a permis de dégager des "tendances" de d'évolution de chaque paramètre en fonction de la température très rapidement. Cette méthode permet d'étendre le domaine de validité des modèles existants. Ceci va dans le sens de la modélisation multiphysique qui se retrouve quasiment dans tous les domaines. Nous comptons poursuivre nos travaux sur la création de nouveaux modèles temporels prenant en compte la température.

### **1.3 Conception, dimensionnement, aide au choix de matériaux**

- **Logiciel Reluctool**. En collaboration avec le G2ELAB et Schneider Electrics, nous développons un logiciel de conception et de dimensionnement pour des systèmes du génie électrique basé sur les réseaux de ré reluctances. A l'intérieur de ces ré reluctances, 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.
- **Aide au choix de matériaux pour actionneurs, capteurs, dispositifs de stockage ...** De manière à pouvoir prédire et quantifier les apports d'un matériau par rapport à un autre pour une application donnée, les compétences indiquées dans les points 1.1 et 1.2 sont nécessaires. Le but ici est de fournir des outils d'aide aux choix des matériaux aux concepteurs pour qu'ils puissent concevoir des systèmes qui deviennent de plus en plus complexes. Ces outils doivent pouvoir reproduire le comportement temporel des matériaux dans des gammes de fréquences allant du DC au MHz dans des plages de température comprises entre 25°C et 400°C.

## **2. Matériaux Dié lectriques et Ingénierie Haute Tension**

### **2.1 Matériaux Ecologiques et phénomènes d'interface**

- **Gaz et mélanges de substitution au SF6 – effet de serre**. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre des recommandations internationales (Sommet de Kyoto) et européennes qui tendent à restreindre fortement l'utilisation de l'hexafluorure de soufre, voire l'interdire pour préserver l'environnement. En effet, ce gaz qui est l'un des meilleurs isolants gazeux actuellement sur le marché (bonne tenue dié lectrique, stabilité et non toxicité), constitue de par la taille et la durée de vie trop importantes (plusieurs siècles) de sa molécule, un agent aggravant de l'effet de serre ; le potentiel d'échauffement global (PEG) de ce gaz est le plus élevé (23900). Il est donc devenu urgent de trouver d'autres gaz ou mélanges gazeux de substitution. Notre objectif à travers les travaux, qui seront menés en collaboration avec des industriels, est de trouver des gaz ou mélanges de gaz à faible effet de serre, pouvant être utilisés pour les applications haute tension et répondant aux critères d'hygiène, de sécurité et d'environnement.
- **Phénomènes de décharges aux interfaces solide/gaz (mélange)**. Les recherches engagés en octobre 2006 sur les phénomènes de décharges dans les gaz et mélanges, et aux interfaces isolants solides/gaz et mélanges en vue de mieux comprendre le développement de ces décharges sur de nouveaux matériaux solides isolants constituant certains composants d'équipements haute tension et plus particulièrement des appareils de coupure, seront poursuivies. La connaissance des conditions d'initiation de ces décharges et les paramètres caractérisant leur propagation jusqu'au contournement est d'une grande importance pour le dimensionnement et l'optimisation des composants et systèmes haute et moyenne tension. Une étude sur la nature fractale de ces décharges surfaciques est en cours. Il s'agit en particulier de corréler la forme des décharges à la dimension fractale pour une interface solide/gaz donnée, c'est-à-dire en fonction de la nature du matériau solide, du gaz (ou mélange) et de la pression.

- **Recherche de nouvelles huiles de substitution aux huiles minérales et synthétiques .** Face à la demande croissante d'utilisation de produits respectant l'environnement dans l'industrie, les transformateurs de distribution sont de plus en plus remplis d'huiles végétales. Le grand défi d'aujourd'hui est d'étendre l'utilisation de ces esters naturels aux transformateurs haute tension où les conditions d'exploitation sont plus sévères. L'engouement pour ces diélectriques liquides à base d'huiles végétales est aussi motivé par deux points fondamentaux : (1) leurs excellentes caractéristiques de résistance au feu (points d'éclair et de mise à feu) comparé à l'huile minérale qui permet une meilleure sécurité dans leur manipulation, leur stockage et leur transport et par conséquent la sécurité d'opération des transformateurs utilisant de tels liquides ; (2) les prévisions alarmantes concernant la pénurie de pétrole à l'horizon des années 2050. L'objectif de nos recherches est de trouver des huiles répondant aux exigences et critères environnementaux et pouvant remplacer les esters synthétiques et les huiles minérales. Ces recherches s'inscrivent dans la continuité de nos travaux sur les phénomènes de préclaquage et de claquage dans les diélectriques liquides.
- **Phénomènes de décharges aux interfaces solide/liquide.** La caractérisation des décharges glissantes se développant sur des interfaces solide/liquide, est d'une grande importance pour la conception, le dimensionnement et la réalisation de structures isolantes pour les systèmes industriels tels que les transformateurs et condensateurs de puissance (traversées, *pressboards* ...) et les extrémités de câbles. Cette action de recherche portera principalement sur l'influence des propriétés physicochimiques de l'interface et des paramètres géométriques de la structure isolante sur les caractéristiques des décharges glissantes, l'influence des additifs et des mélanges d'huiles, du type de tension appliquée ainsi que des paramètres d'état sur la génération et la propagation de ces décharges, l'élaboration de modèle dynamique décrivant les décharges glissantes, la recherche de dimension fractale régissant la propagation des décharges glissantes et son lien avec les propriétés de l'interface.
- **Diagnostic sur l'appareillage haute tension rempli d'huile.** Les compétences acquises sur les phénomènes de préclaquage et de claquage dans les liquides et aux interfaces solide/liquide, nous ont conduit (en 2006) à développer des collaborations avec la chaire ISOLIME (*Canadian Research Chair on Insulating Liquids and Mixed Dielectric for Electrotechnology*) de l'Université du Québec à Chicoutimi. Notre objectif est de développer des techniques de diagnostic pour équipements électriques remplis d'huile et plus particulièrement sur les transformateurs et condensateurs de puissance. Cette collaboration qui a déjà donné lieu à de nombreuses publications, se poursuivra avec des thèses en co-direction.

## 2.2 Longue décharge et foudre – Modélisation et Applications

- **Modèles prédictifs de décharges dans les grands intervalles d'air et applications.** Nos travaux sur la modélisation de la longue décharge dans l'air vont se poursuivre avec l'amélioration des modèles prédictifs que nous avons élaborés tant pour la longue décharge positive que négative, ainsi que leur utilisation en ingénierie haute tension. Il s'agira en particulier de prédire les caractéristiques macroscopiques de la décharge dans un intervalle d'air donné, et de mettre au point des simulateurs permettant de déterminer la tension  $U_{50}$  (tension à 50 % d'amorçage), paramètre de très grande importance pour le dimensionnement des structures isolantes dans l'appareillage haute tension.
- **Modèles prédictifs des décharges de foudre et applications.** Cette action a pour but l'amélioration du modèle prédictif que nous avons élaboré pour la décharge de foudre négative en se basant sur la grande similarité, grande étincelle - décharge atmosphérique. Ce modèle nous permettra de caractériser l'environnement électromagnétique (CEM) associé au précurseur de foudre et à l'arc en retour, d'analyser l'influence de la nature des sols (résistivité) sur l'attractivité de la décharge de foudre, de déterminer la répartition des courants de foudre dans le sol et de prédéterminer les paramètres de protection contre la foudre négative tels que le point d'impact et la distance de foudroiement. L'impact des surtensions de foudre et de manœuvre, sur le comportement des réseaux haute tension et de leurs constituants sera également étudié.
- **Phénomènes de pollution des isolateurs – Contournement.** La recherche de moyens, voire de modèles prédictifs, permettant de prévenir le phénomène de contournement d'isolateurs pollués a été et demeure l'un des objectifs des spécialistes du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Les études que nous menons dans ce sens depuis 1994, tant au niveau théorique qu'expérimental et dans le cadre des diverses thèses, vont se poursuivre afin d'établir des modèles prédictifs dynamiques de contournements d'isolateurs

polluées (dépôts continus et discontinus) sous différentes formes de tension et de déterminer les caractéristiques locales des décharges (courant, charge, vitesse,...) de plus en plus performants. Des collaborations sur cette thématique ont été développées avec la chaire CIGELE de l'université du Québec à Chicoutimi et l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Algérie.

### **2.3. Interaction champ électrique – environnement : Réduction des NOx (oxydes d'azote) par plasmas froids**

Les émissions de gaz par les véhicules automobiles (gaz d'échappement) ou par les industries n'ont cessé d'augmenter ces dernières décennies. Ainsi, l'élimination des particules toxiques ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , ...) présentes dans ces gaz polluants est d'un intérêt majeur pour la sauvegarde de l'environnement. Actuellement, les procédés de traitement utilisés sont surtout chimiques ; leur efficacité est assez limitée. La recherche de techniques complémentaires ou d'autres techniques est devenue donc une nécessité. Parmi les techniques prometteuses, celle qui consiste à utiliser des réacteurs plasmas froids générés par décharge couronne ou à barrière diélectrique. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux que nous comptons poursuivre. Il s'agit de la réduction des oxydes d'azote issus de la combustion dans les moteurs thermiques (Diesel) par plasmas froids. Le but de ces recherches 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 ont été faites et le banc d'essai est en cours de finalisation.

### **3 Eco-conception**

Depuis la publication en 2005 par l'Union Européenne de la directive EuP, l'éco-conception est devenue une réelle préoccupation pour les industriels et les organismes de normalisation du secteur électrique. C'est ainsi, que sont apparus des comités techniques ad hoc créés par la CEI et le Cenelec. Pourtant, bien que l'éco-conception soit riche d'outils et de méthodologies pour sa mise en œuvre, tout démontre que les consensus internationaux en la matière ne sont pas encore atteints. En effet, initier une telle démarche d'éco-conception signifie une profonde remise en cause des méthodes habituelles de travail des bureaux d'études et nécessite d'intégrer des aspects de conception très divers et de mobiliser des acteurs qui le sont rarement dans les développements classiques de produits. De nombreuses actions ont été menées sur des produits électriques extrêmement divers et au sein de certains industriels ; de nombreux produits ont d'ores et déjà bénéficié de cette approche (voire AREVA T&D par exemple). L'expérience aidant, il apparaît aujourd'hui que cette « approche produits » n'est plus suffisante, et se pose maintenant la question de l'intégration de ces différents produits dans les systèmes complets : les sous-stations électriques voire les réseaux complets. S'attaquer à la problématique de l'éco-conception des systèmes constitue dès lors une suite logique de la démarche initiée par l'entreprise. Or en la matière, les outils disponibles, les méthodologies sont bien plus difficiles à mettre en place et à appliquer que pour les simples produits.

L'un des objectifs du groupe est de mettre en place des outils et méthodologies applicables, dans le cadre industriel, à des systèmes complets. Cette démarche s'appuiera bien évidemment sur l'expérience acquise chez nos partenaires industriels sur des produits électriques. Et l'on cherchera à permettre aux concepteurs de répondre aux questions essentielles concernant l'impact environnemental des systèmes en tenant compte des contraintes que sont les délais et les coûts acceptables pour construire ces réponses.

En particulier, on passera en revue les approches simplifiées en matière d'indicateurs (pondération/sélection d'impacts), latitude de conception (optimisation maximale du système, à partir d'une feuille blanche ; optimisation avec reconfiguration du système, sans changement de structure ; amélioration d'un système existant), analyse du cycle de vie....

### **Pertinence des perspectives et positionnement**

Les travaux du groupe « Matériaux pour le Génie Electrique » sont reconnus tant au niveau national qu'international aussi bien pour les activités portant sur les matériaux et composants magnétiques que sur les matériaux diélectriques et l'ingénierie haute tension. En particulier :

- Le groupe « Matériaux pour le génie électrique » est le seul groupe français à avoir développé une plate-forme de partage des connaissances « Magathèque » (mesures, caractéristiques de matériaux,...) sous la forme d'une base de données accessible par internet.

- Il est le deuxième groupe français (avec le G2ELAB) à voir ses modèles de comportement de matériaux intégrés dans un logiciel commercial de dimensionnement (Reluctool-CEDRAT).
- Au niveau international, le groupe est un des rares à développer des modèles de comportement des matériaux magnétiques en prenant en compte la température pour les

intégrer dans des logiciels de conception et ou dimensionnement. Le groupe peut aller aussi bien du matériau vers le système ou du système vers le matériau.

- Notre groupe est l'un des rares au monde à mener des travaux sur les phénomènes de décharges se propageant aux interfaces solide/liquide et solide/gaz pour des applications industrielles avec les deux aspects : amont et aval.
- Les modèles prédictifs de la longue décharge dans l'air et de la décharge de foudre sont reconnus à travers le monde. Nous sommes l'un des rares, voire le seul laboratoire universitaire, à travailler sur cette thématique en France. Les modèles prédictifs de contournement d'isolateurs pollués sont aussi l'une des spécificités de notre groupe, le seul travaillant au niveau national sur un sujet de très grande importance pour la qualité du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- A notre connaissance, notre groupe est le seul au niveau national à s'engager avec un industriel, sur la recherche de gaz à faible effet de serre pour le remplacement de l'hexafluorure de soufre. Elle est aussi la seule avec le G2ELAB à travailler sur les nouvelles huiles de substitution (à moindre impact sur l'environnement) aux huiles minérales et synthétiques.
- A la différence des divers laboratoires travaillant sur la dépollution par plasma froid des oxydes d'azote (NOx), notre stratégie consiste à mener des recherches sur les gaz d'échappement réels avec prise en compte des régimes transitoires (accélération, décélération ....).

## **Dimensions sociétales des perspectives**

Les résultats des actions de recherche du groupe auront des retombées importantes sur la société tant pour l'approfondissement des connaissances sur les matériaux que pour la santé publique, le bien être des personnes, la protection de l'environnement et le développement durable.

La création de base de données des divers matériaux (magnétiques en particulier) caractérisés au laboratoire, ouverte vers l'extérieur sera accessible par le Web (connexion par login et mot de passe). Cette base de données constituera un outil de partage des connaissances, du même type que la plateforme de partage de modèles développée dans le projet DIMOCODE dans lequel nous sommes impliqués.

Une bonne coordination de l'isolement et un bon choix des matériaux (diélectrique, magnétiques ...) dans la conception des dispositifs (transformateurs, inductances et condensateurs pour la compensation ...), permettront d'assurer une meilleure qualité de l'énergie électrique, une réduction significative des pertes dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, une réduction des perturbations électromagnétiques et des coupures (mise hors service) résultant des surtensions de foudre et de manoeuvre. L'élaboration et la mise en oeuvre de modèles pour la prédiction des points d'impact des décharges de foudre et des techniques de protection des personnels et des structures contre la foudre, la caractérisation de l'environnement électromagnétique de la foudre permettront d'atteindre ces objectifs. Les modèles prédictifs élaborés permettent aussi un dimensionnement rapide de l'appareillage en réduisant les coûts, les temps d'essai et le nombre de prototypes avant industrialisation. Aussi, la recherche de matériaux écologiques a pour objectif de réduire l'effet de serre résultant de l'utilisation actuelle de certains gaz comme le SF<sub>6</sub> dont le PEG est de 29000 fois celui du CO<sub>2</sub>, d'utiliser des huiles végétales donc renouvelables en lieu et place des huiles minérales à base de pétrole et synthétiques. L'aboutissement de nos recherches sur l'utilisation des plasmas froids permettra de réduire les émanations de NOx dans l'atmosphère et de réduire les nuisances et la pollution pour les populations. Enfin l'éco-conception permettra de répondre aux exigences actuelles de la société.

Les résultats de nos recherches nourrissent également les enseignements qu'assurent les membres du groupe à différents niveaux : formation initiale, formation continue et master.

## **Collaborations envisagées**

Le groupe compte maintenir les collaborations qu'elle entretient avec des partenaires universitaires et industriels tant au niveau national qu'international.

### **Collaborations nationales :**

- collaborations avec G2ELAB, DIOM, LAPLACE, LGEF
- collaborations industrielles : EDF R&D, RTE, Schneider, AREVA T&D, ABB, Hispano-Suiza
- ...

### **Collaborations universitaires internationales :**

- IPEE - Wroclaw University of Technology – Pologne
- IE – Polish Academy of Sciences (PAN) – Antenne de Wroclaw - Pologne
- Chaire ISOLIME (Canada Research Chair on Insulating Liquids and Mixed Dielectric for Electrotechnology) - Université du Québec à Chicoutimi – Canada
- Chaire CIGELE (Industrial Chair on Atmospheric Icing of Power Network Equipment) - Université du Québec à Chicoutimi – Canada
- Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,
- Universités des Sciences et de la Technologie algériennes : Alger, Tizi-Ouzou et Oran.
- Université de Yaoundé – Cameroun.
- Tishreen University, Mechanical and Electrical Engineering Faculty, SYRIA ;
- Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire ;
- Ecole Nationale d'Ingénieurs de SFAX, TUNISIE.

De nouvelles collaborations vont démarrer avec des laboratoires étrangers. Il s'agit en particulier de :

- MIT – USA
- Université Nationale de Tucuman – Argentine
- EcoTopica Science Institute, Nagoya University

Le groupe « Matériaux pour le Génie Electrique » est aussi impliquée dans le GDR SEEDS (Systèmes d' Energie Electrique dans leur Dimensions Sociétales) avec sa participation aux socles « Matériaux », « Méthodes et Méthodologies » et au pôle « ISP3D ». Certains de ses éléments sont membres de plusieurs comités scientifiques et commissions d'experts nationaux et internationaux.

### **Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet**

Certains de nos projets de recherche nécessiteront l'acquisition de matériels spécifiques. Il s'agit :

- d'un photomultiplicateur infra-rouge, d'une cellule à disque tournant (cellule CIGRE) pour la mesure de l'électrisation statique des huiles.
- d'une caméra infra-rouge, d'un banc de caractérisation magnétique haute température et d'une cage amagnétique.

### **Mot du (des) responsable(s)**

Le groupe Matériaux pour le Génie Electrique est arrivée aujourd'hui à maturité et à un fonctionnement optimum. L'enthousiasme de ses membres à travailler ensemble est un atout majeur pour la réalisation de l'ambitieux programme de recherche proposé. Malgré le nombre réduit de ses effectifs, surtout en « diélectriques et ingénierie haute tension », des résultats très originaux ont été obtenus par le groupe. Et les axes de recherche affichés pour l'avenir et en particulier les thèmes novateurs comme la recherche de matériaux à faible impact sur l'environnement, ne feront que l'affirmer dans sa position de leader tant au niveau national qu'international. Ces recherches s'appuient sur des installations uniques en France (centre d'essais haute tension, banc de caractérisation magnétique ...).

L'un des défis relevé par le groupe a été celui de conjuguer les compétences des deux sensibilités de ses membres, magnétique et diélectrique, et de mener des actions communes. Des collaborations fructueuses avec les autres groupes du laboratoire sont menées dans le cadre de projets de recherche institutionnels ou industriels. Pour aller encore de l'avant dans ses recherches, il est souhaitable qu'un effort de recrutement de personnels (chercheurs ou enseignant chercheur) soit fait.

Enfin, le groupe jouit d'une reconnaissance au niveau mondial de par ses publications dans des revues de haut niveau avec la participation de certains de ses membres à de nombreux comités scientifiques de conférences et de commissions d'experts internationaux. Le groupe participe à la dissémination scientifique par la rédaction de chapitres d'ouvrages en français et en anglais.



**Département**  
**"Bioingénierie"**

---

*Projet du département*

*Groupe "Bioélectromagnétisme et microsystèmes"*

*Groupe "Génomique microbienne environnementale"*

## Département "Bioingénierie"

**Objectif général :** Faire émerger de nouveaux concepts fondamentaux, de nouvelles méthodes et de nouvelles applications en bioingénierie en s'appuyant sur une synergie entre le Génie Electrique, la Science des Microsystèmes et la Biologie.

**Mots-clef :** Ingénierie écologique, biomédical, interaction champs/cellule, interaction champs/communauté, microsystèmes, biopiles, bioremédiation, adaptation bactérienne, métagénomique, évolution moléculaire.

### Structure et du Département

#### Liste des personnels

Nom	Prénom	Fonct.	Etabl.	HDR	Groupe	Contribution scientifique
BARTHOLLET	Richard	T	ECL			Biopiles
BURAI	Noël	PU	UCBL	x	B&M	Modélisation, dosimétrie
BURET	François	PU	ECL	x	B&M	Modélisation, énergie pulsée
CECILLON	Sébastien	AI	ECL		GME	Puces à ADN
FABREGUE	Olivier	IR	CNRS		B&M	Modélisation, informatique
FRANQUEVILLE	Laure	IR	CNRS		GME	Biologie moléculaire
FRENEA-ROBIN	Marie	MCF	UCBL		B&M	Microsystèmes
HADDOUR	Naoufel	MCF	ECL		B&M	Microsystèmes
LACROIX	Monique	IR	CNRS		GME	Chimie et Microbiologie
LAFAY	Bénédicte	CR	CNRS		GME	Biologie évolutive
NAVARRO	Elisabeth	CR	IRD		GME	Génomique microbienne
NICOLAS	Laurent	DR	CNRS	x	B&M	Modélisation
SCORRETTI	Riccardo	CR	CNRS		B&M	Modélisation
SIAUVE	Nicolas	MCF	UCBL		GME	Hyperthermie, caractérisation
SIMONET	Pascal	DR	CNRS	x	GME	Génomique microbienne
VOGEL	Timothy M.	PU	UCBL	x	GME	Génomique microbienne
VOYER	Damien	MCF	ECL		B&M	Modélisation, calcul stochastique

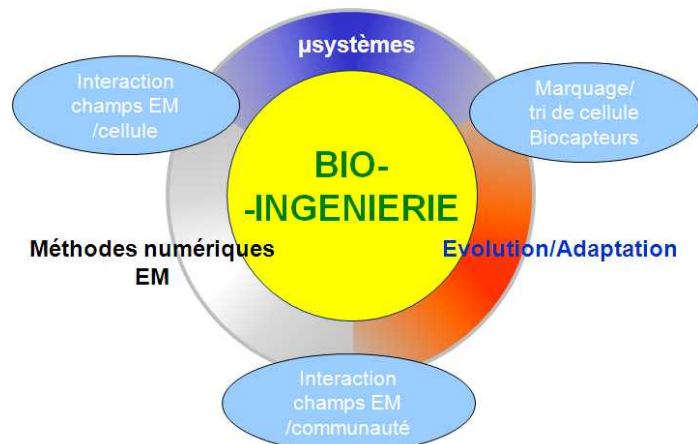
#### Structure

Ce département est constitué de deux groupes de chercheurs qui viennent de champs disciplinaires très différents et qui apportent chacun des compétences complémentaires dans le contexte de la bioingénierie:

- Bioélectromagnétisme et microsystèmes (B&M, resp : Riccardo Scoretti) : ce groupe apporte l'essentiel de la compétence en ingénierie plus précisément dans le domaine du Génie Electrique et de la physicochimie. Le cœur scientifique du savoir faire de ce groupe se situe d'une part dans les méthodes numériques de calcul de champ électromagnétique et la modélisation numérique de manière générale, d'autre part dans la conception et la mise en œuvre de microsystèmes permettant d'agir au niveau de la cellule.
- Génomique microbienne environnementale (GME, resp : Pascal Simonet) : ce sont dans les sciences du vivant et plus particulièrement en génomique appliquée à la microbiologie environnementale que se situent les compétences des chercheurs de ce groupe. Les recherches sont centrées sur l'étude des mécanismes d'adaptation et d'évolution bactérienne, notamment le transfert horizontal de gènes ; elles ciblent principalement les environnements telluriques soumis à des contraintes naturelles ou anthropiques et s'appuient largement sur l'approche métagénomique pour développer des applications liées à la bioremédiation et au développement de bioindicateurs.

## Objectifs

L'objectif est d'aborder la bioingénierie par l'indispensable approche pluridisciplinaire possible du fait des compétences complémentaires des deux groupes de recherche du Département mais cette démarche se doit d'être ancrée sur une très forte assise fondamentale dans chacun des domaines scientifiques concernés. Ceci justifie que les aspects fondamentaux de nos études aient naturellement leur centre de gravité à l'intérieur de chacun des deux groupes de recherche, la stratégie pluridisciplinaire et la double vocation fondamentale et appliquée devant nécessairement se conjuguer à une recherche de haut niveau centrée sur les aspects fondamentaux des thématiques propres de chacun des groupes qui constituent le Département « bioingénierie ». Cependant, comme le



montre le schéma ci-contre, trois thèmes de convergence aux interfaces des principales thématiques du Département peuvent être identifiés pour permettre la mise en commun des compétences. A titre d'exemple nous pouvons citer l'apport des compétences des spécialistes en microsystèmes qui, grâce au marquage de l'ADN par des nano-particules magnétiques et la possibilité de manipuler des cellules bactériennes isolées, vont permettre aux microbiologistes d'enrichir leurs approches métagénomiques en leur offrant la possibilité de séquencer le génome d'une seule cellule isolée par micromanipulation.

Mais c'est au niveau des applications que la nature pluri- et interdisciplinaire du département trouve toute sa justification même si les différentes compétences qui s'y rejoignent ne permettent bien évidemment pas de couvrir l'ensemble du spectre de la bioingénierie définie comme l'application des concepts et des méthodes de l'ingénierie sur le vivant.

Différents sous-domaines de la bioingénierie peuvent cependant être abordés dont nous présentons ci-dessous quelques exemples :

- Le biomédical en ce qui concerne l'interaction de l'être humain avec les champs électromagnétiques, que ce soit dans un but d'évaluation ou de prévention des risques liés à l'exposition ou que ce soit dans un but thérapeutique. Les microsystèmes peuvent de leur côté apporter une contribution au développement de systèmes d'analyse et de traitement biologique (tri cellulaire, électrofusion, électrotransformation...). Ces activités sont essentiellement portées par le groupe B&M et mettent en jeu les synergies entre les compétences principales de ce groupe. Les compétences dans le domaine médical lorsqu'elles sont indispensables à l'avancement des recherches sont bien évidemment recherchées à l'extérieur du département et de l'UMR via des collaborations et des projets de recherche en commun.
- L'ingénierie écologique, domaine de la bioingénierie qui, grâce à l'apport des sciences et techniques de l'ingénieur à différents aspects fondamentaux et mécanistiques de la recherche en biologie, vise à apporter des solutions à des problèmes environnementaux. La complémentarité entre les microbiologistes et les divers spécialistes en ingénierie du Département place le Laboratoire Ampère en leader français et européen pour le développement de cette thématique. Le projet sur le développement des piles à combustibles microbiennes, ou biopiles, est un des plus explicites exemples de l'intérêt de la complémentarité des compétences du Département pour l'élaboration d'actions en ingénierie écologique. Ces réacteurs, permettant de produire de l'électricité à partir de déchets organiques contenus dans les effluents domestiques, industriels ou agricoles, nécessitent pour leur développement des recherches tant pour optimiser la récupération de l'énergie que pour comprendre et optimiser la formation du biofilm sur les électrodes par la sélection ou même la construction génétique de souches bactériennes électro-actives. Biologistes et spécialistes en électromagnétisme doivent enfin se retrouver pour modéliser le comportement de la biopile. Les projets de bioremédiation des sols constituent d'autres exemples d'actions d'ingénierie écologique où la complémentarité est susceptible d'apporter des solutions innovantes. L'injection de courants impulsifs dans les sols, initialement développée par les électrotechniciens et les microbiologistes pour simuler la décharge naturelle de foudre

dans le sol et étudier son impact sur l'évolution des génomes bactériens via le transfert horizontal de gènes, pourrait être utilisée pour accroître le brassage génétique au sein de la communauté bactérienne d'un sol soumis à une contamination par des composés xénobiotiques et accélérer l'apparition de souches aptes à dégrader ces contaminants.

## **Enjeux**

Quelques années déjà de cohabitation au sein d'un même laboratoire entre spécialistes de domaines scientifiques aussi éloignés que ceux relatifs au Génie Electrique, à la physicochimie et à la microbiologie ont montré tout l'intérêt de ces rapprochements. Loin d'affaiblir la productivité dans les domaines scientifiques respectifs concernés, la cohabitation a au contraire permis d'ouvrir de nouveaux axes de recherche concernant tant le volet fondamental de la recherche que ses applications en bioingénierie et ingénierie écologique. Si souvent souhaitée par notre hiérarchie, la pluridisciplinarité est effective dans le Laboratoire Ampère et la création du Département « Bioingénierie » vise encore à accroître les relations entre les communautés. Il apparaît de plus en plus que même les thématiques fondamentales ou appliquées censées être spécifiques de tel ou tel domaine scientifique peuvent bénéficier d'apports d'une autre discipline comme peuvent l'être la simulation de la foudre pour comprendre l'adaptation bactérienne, l'utilisation de micro et nano systèmes en métagénomique, le développement des piles à combustibles microbiennes par des approches sur les structures et propriétés des électrodes en fonction de leur réactivité avec la microflore. Fort de ce constat, les objectifs d'une structuration en départements sont de renforcer ces possibilités d'interactions en favorisant le dialogue, en permettant une meilleure acquisition par chacun des concepts ou techniques qu'il ne maîtrise pas, même si le but n'est pas de demander aux chercheurs du Génie Electrique de devenir des biologistes ou des microbiologistes confirmés et inversement. Par contre, l'organisation de séminaires en commun, d'ateliers de travail, l'échange de bibliographie, la disponibilité des uns et des autres pour présenter clairement une problématique scientifique ou une nouvelle méthodologie, seront de nature à permettre au plus grand nombre de se familiariser avec l'ensemble des thématiques et de participer ainsi au développement de futurs projets pluridisciplinaires.

## Groupe "Bioélectromagnétisme et Microsystèmes"

**Objectif général** : modélisation et caractérisation électromagnétique des systèmes biologiques

**Mots-clef** : Modélisation numérique en électromagnétisme, dosimétrie 3D, maillage complexe, caractérisation électromagnétique des tissus, modèle de cellule, microdosimétrie, microsystèmes, manipulation cellulaire, électroporation, diélectrophorèse, magnétophorèse, bioremédiation, biomédical.

### Structure et compétences du groupe

Le groupe est essentiellement constitué de chercheurs en Génie Electrique, mais il comprend également des physicochimistes. Les principales compétences se situent au niveau :

- des méthodes numériques de modélisation des phénomènes électromagnétiques. Le champ d'application de ces méthodes se situe principalement, mais pas de manière exhaustive, au niveau des systèmes biologiques.
- de la conception et de la mise en œuvre de microsystèmes permettant d'agir à une échelle spatiale qui est celle de la cellule (eucaryote ou procaryote).

### Perspectives de recherche

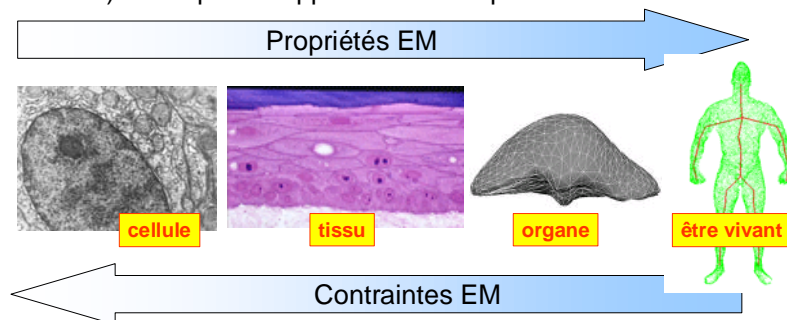
#### Contexte

A l'issue du précédent quadriennal qui a vu l'installation réussie au Laboratoire Ampère de chercheurs en microbiologie environnementale, nous avons décidé de regrouper au sein d'une même entité les chercheurs travaillant sur la thématique "interaction champ-vivant" qui reste une des priorités scientifiques bien établie du Laboratoire. Ce regroupement est parfaitement en cohérence avec les activités du Laboratoire et vient renforcer la composante Ingénierie de l'ancienne « Microsystèmes et Microbiologie » qui avait été affaiblie par le départ du groupe Microcapteurs animé par Nicole Jaffrezic (DR CNRS, aujourd'hui au Laboratoire de Sciences Analytiques UCBL). L'interaction avec le deuxième groupe du Département se fera sur le développement des techniques et des applications de Bioingénierie.

#### Objectifs

La vision à long terme que nous avons des objectifs scientifiques est résumée sur la figure ci-dessous qui schématise les différentes échelles spatiales auxquelles nous sommes confrontés dans les problèmes scientifiques qui nous intéressent. Dans le cas de l'interaction champs électromagnétiques/corps humain, cette échelle part de la cellule et même en deçà (membrane, noyau par exemple) jusqu'à l'organisme entier. De manière très synthétique, il s'agit d'être capable d'effectuer les changements d'échelles suivants :

- détermination des propriétés électromagnétiques (et thermiques) aux échelles mésoscopiques et macroscopiques des tissus et des organes à partir des caractéristiques et des constituants des cellules.
- évaluation des contraintes électromagnétiques locales à partir de la connaissance des champs macroscopiques. Par exemple, la maîtrise de l'électroporation cellulaire suppose que l'on soit capable d'évaluer avec précision le champ électrique transmembranaire (à une échelle typique de quelques nanomètres) alors que les applicateurs sont plutôt à l'échelle du centimètre.



Cette démarche, illustrée ici sur l'exemple du corps humain, s'applique à d'autres systèmes biologiques ou à des systèmes mixtes. Par exemple, le laboratoire Ampère a montré que l'injection de courant dans les sols était susceptible de provoquer l'électrotransformation de cellules bactériennes avec des fréquences de transformation significatives. Ce phénomène qui est susceptible d'être mis à profit dans des procédés de dépollution ne peut être optimisé, par exemple sur le plan énergétique, que si l'on est capable d'évaluer les contraintes à l'échelle de la bactérie avec une prise en compte des propriétés de la matrice du sol.

### **Perspectives, défis relevés et verrous adressés**

A court terme, la démarche scientifique du groupe consiste à attaquer le problème par les deux extrémités de l'échelle spatiale en travaillant d'une part au niveau de la cellule, et d'autre part au niveau de l'organe ou de l'être vivant dans son ensemble.

Cette approche s'appuie évidemment sur les compétences actuelles du groupe. Elle permet de progresser dans nos objectifs à long terme et est porteuse dans l'immédiat d'applications intéressantes. Elle se décompose en 4 actions principales qui sont plus ou moins couplées :

#### **Dosimétrie**

La dosimétrie numérique 3D en électromagnétisme est une activité bien établie pour laquelle le Laboratoire Ampère est reconnu depuis plusieurs années, notamment en basses et moyennes fréquences (< GHz), avec le développement de modèles ou formulations mathématiques spécifiques aux caractéristiques physiques des organes et au type d'exposition électromagnétique. Il s'agit là d'une part de limiter les risques sanitaires liés à l'utilisation grandissante de l'électricité en tant que vecteur d'énergie ou support de l'information, et, d'autre part, d'utiliser les champs électromagnétiques à des fins médicales. Pour cela, il est indispensable de quantifier avec précision les phénomènes induits dans le corps humain, soit pour savoir si les niveaux de champs, de courants induits, de DAS (Débit d'Absorption Spécifique) ou de températures ne dépassent pas des valeurs seuils, soit pour savoir si leur répartition est conforme à certains critères. Les travaux de recherche porteront donc également sur les effets biologiques des champs électromagnétiques sur l'organisme humain afin d'avoir une vision la plus objective possible de ces valeurs seuils.

Il faut souligner que les simulations numériques que nous avons effectuées jusqu'à présent ne portent que sur quelques géométries humaines pour lesquelles nous disposons de bases de données morphologiques internationales (exemples : "Visible Human Project", "Virtual Family"). Des simulations haute résolution (< 0.5 mm) sont indispensables, mais elles impliquent a priori des coûts en proportion (exemple : 100 millions d'inconnues pour des mailles de 1 mm). Des travaux importants sur le plan numérique sont encore à mener, impliquant notamment la recherche de nouvelles formulations mathématiques plus adaptées. Des progrès restent également à faire pour une génération toujours plus performante du maillage volumique haute résolution du corps humain. La maîtrise de l'erreur numérique et l'optimisation de ce maillage constituent une autre problématique de ce type de géométrie (complexe avec interfaces de faibles épaisseurs).

La prise en compte de la variabilité des paramètres du corps humain est également essentielle pour rendre compte de la réalité de manière correcte. Le Laboratoire Ampère a initié, avec la fondation Santé et Radiofréquences, un projet qui vise à quantifier, dans les simulations numériques, les effets des incertitudes sur les paramètres tels que la morphologie ou les caractéristiques électromagnétiques des tissus. En faisant de la sorte, on souhaite extraire plus d'informations sur ces indicateurs d'exposition, notamment des caractéristiques statistiques telles que la moyenne, la variance ou la fonction de densité de probabilité.

Notre approche s'appuiera sur la méthode dite des éléments finis stochastiques que nous avons déjà testée dans ce domaine uniquement dans le cas de problèmes 2D. La principale difficulté réside dans le fait que les problèmes numériques sont généralement 3D et que par conséquent une simulation pour un jeu de paramètres d'entrée donné requiert beaucoup de temps. Il faut donc développer des solutions qui permettent de réduire considérablement les temps de calculs. Parallèlement à cette démarche de modélisation numérique, nous développerons également les aspects expérimentaux. Le premier concerne la caractérisation diélectrique et thermique de milieux biologiques complexes (tissus, organes) dans la gamme de fréquences comprises entre quelques Hz et quelques GHz. Le second porte sur la quantification expérimentale des phénomènes induits (électromagnétique et thermique) dans un organisme vivant (animal). Il s'agit là d'un véritable verrou car jusqu'à présent nous n'avons pas réellement de moyen permettant de valider nos simulations numériques. Certaines études montrent qu'il est peut-être possible de visualiser par IRM les courants induits in vivo.

## Modèles de cellules

Alors que la dosimétrie s'attache à développer des modèles au niveau de l'être vivant dans son ensemble, on travaille ici au niveau de la brique élémentaire du vivant. Nous avons acquis une expérience certaine à ce niveau notamment en développant des modèles surfaciques de membranes. Il reste cependant de nombreux points à travailler au niveau des modèles de cellules. En premier, bien que la cellule soit l'élément de base du vivant, elle n'en est pas moins de constitution complexe et on se trouve confronté à un problème classique en modélisation qui est celui de la finesse de la description : quels éléments de la cellule devons-nous prendre en compte en fonction du contexte applicatif ou du but visé? Ce point est également rendu assez ardu par le fait que les contextes d'utilisation des modèles de cellule couvrent une gamme très étendue de fréquences dont la borne supérieure dépasse le gigahertz (voire le térahertz). Par exemple, de récents développements mettant en œuvre des technologies sophistiquées (impulsions sub nanosecondes) ont montré que l'effet du champ électrique permettait de cibler les organites. En second, et c'est sur ce point que nous ferons principalement porter notre effort, nous développerons des modèles permettant de décrire la formation de pores dans une membrane par application d'un champ électrique. Ces modèles seront bâtis à partir de deux approches :

- Insertion, dans les modèles de membranes existants, de l'équation de Smoluchowski qui est une équation analytique permettant de décrire statistiquement la dynamique de l'ouverture des pores. Il est aussi possible d'utiliser des modèles asymptotiques provenant de cette équation.
- Couplage avec les techniques de dynamique moléculaire. En effet les développements récents dans les simulations en dynamique moléculaire (DM) permettent une approche précise des phénomènes qui affectent l'organisation locale de la membrane quand elle est soumise à une impulsion de champ. L'objectif principal que nous cherchons à atteindre est de construire le lien manquant entre les échelles moléculaire et macroscopique à laquelle les méthodes numériques classiques de calcul sont pertinentes. Nous pensons qu'une telle approche permettra de mieux appréhender les mécanismes de l'électroperméabilisation qui se déroulent dans des systèmes vivants soumis à des impulsions électriques. Accessoirement, cette approche permettra d'apporter des informations pertinentes sur la membrane lipidique qui est pour le moment décrite par une zone à permittivité et résistivité constante alors qu'en fait ces paramètres évoluent de manière non linéaire durant l'application du champ, ce qui affecte sa distribution. Cette transition entre l'échelle de la membrane (DM) et l'échelle de la cellule (électromagnétisme local) est un point clef des modèles de cellule. Si dans son principe, cette transition ne pose pas de problème, elle reste délicate dans la pratique car les possibilités de calcul en DM réduisent de manière drastique les durées simulées et les étendues spatiales de membrane prises en compte.

## Microsystèmes

Il s'agit ici de développer des systèmes de taille micrométrique ou submicrométrique permettant de manipuler et éventuellement traiter des particules de petite taille (micro-nanométrique) et évidemment des cellules biologiques.

Lors du précédent quadriennal, nous avons développé des systèmes de diélectrophorèse conventionnelle et d'électrorotation. Ces systèmes nous ont permis de mettre en place un banc de caractérisation électromagnétique de cellules biologiques. Sur ce banc, l'acquisition automatique et fiable des spectres diélectrophorétiques, sans être un enjeu fondamental, reste un objectif que nous souhaitons atteindre rapidement afin d'en avoir une exploitation efficace et d'extraire rapidement les paramètres diélectriques de cellules pour alimenter le développement des modèles.

L'expérience acquise sur ces premiers systèmes servira également de base au développement de microsystèmes permettant d'étudier les mécanismes intervenant dans la fusion cellulaire et l'électroperméabilisation. Il s'agit d'un objectif particulièrement important puisqu'outre les applications directes de ces microsystèmes, ceux-ci pourront servir d'outils de validation des modèles d'électroperméabilisation.

Par ailleurs, deux nouveaux axes seront développés. Le premier axe concerne le tri de cellules à l'aide de microsystèmes magnétiques. A travers ce projet, d'autres techniques de manipulation de cellules pourront également être explorées (par voie fluïdique, optique, acoustique), ce qui devrait à plus long terme conduire au développement de microsystèmes hybrides. Le second axe porte sur l'auto-assemblage de nanoparticules par diélectrophorèse ou magnétophorèse. L'une des applications concerne l'orientation de nanoparticules d'or en vue de polariser la lumière incidente.

## Microdosimétrie

A long terme, il s'agit ici de déterminer comment une communauté bactérienne colonisant un environnement est modifiée lors de l'application d'un champ électromagnétique. Nous avons, par exemple, l'expérience pratique de ce type de situation lors de l'injection de courants dans les sols. Dans un premier temps, l'effort portera sur le passage des valeurs de champs appliqués au niveau macroscopique au champ local auquel va être soumise une bactérie dans un milieu comme un sol. Il est évident que l'approche ne peut se faire que sur une base statistique tenant compte de la variabilité de la matrice du sol et la répartition probable des populations bactériennes dans ce type d'environnement. La même approche appliquée à des tissus devrait permettre d'obtenir d'une part leurs caractéristiques diélectriques macroscopiques, et d'autre part, de relier le champ local au champ appliqué.

## Pertinence des perspectives et positionnement

Dans le domaine de la dosimétrie numérique, une équipe de France Télécom R&D en relation avec le laboratoire XLIM travaille activement sur les méthodes numériques pour l'estimation de la densité de puissance absorbée ou de l'augmentation de température dans les tissus exposés à des sources Radio Fréquence. Cette équipe travaille également depuis peu sur l'apport des statistiques avec des études sur l'influence de la morphologie. Mais ces travaux restent limités en raison des temps de calcul rédhibitoires qui nécessitent de nouvelles approches.

S'agissant de la modélisation de cellule, il y a peu d'activité en France mais plusieurs équipes sont actives au niveau international. L'équipe WEAVER au MIT (USA) travaille sur la modélisation des phénomènes d'électroporation et sur des techniques d'homogénéisation (amas de cellule). Cependant, tous les modèles utilisés sont simplement 2D et ne sont, par conséquent, pas complètement satisfaisants. L'équipe Schoenbach (Norfolk – USA) développe un modèle numérique 3D à symétrie sphérique et des modèles de type réseau. L'électroporation est prise en compte avec l'équation de Smoluchowski. L'équipe de biocybernétique dirigée par Miklavcic (Ljubjana) développe principalement des modèles analytiques.

En France, l'IEMN travaille sur la caractérisation de cellules uniques, mais en faisant de la spectroscopie THz ou de la spectro d'impédance en BF. Dans tous les cas le capteur ne joue pas le rôle d'actionneur comme dans les microsystèmes que nous développons. Une autre équipe de l'IEMN démarre sur les techniques d'orientation de nanofils par diélectrophorèse par champs glissants (tw-DEP).

## Dimensions sociétales des perspectives

La maîtrise des effets des champs électromagnétiques sur le vivant constitue un enjeu majeur au sein des sociétés industrialisées. En effet, la dernière décennie a vu monter l'expression de réticences devant le déploiement massif de technologies nouvelles comme les systèmes de transmission de l'information par voie hertzienne. La perte de confiance dans la science et les techniques en général en tant que source de progrès fait que ces réticences s'expriment également sur une technologie déjà centenaire comme le transport et la distribution de l'énergie électrique. Ces technologies constituent pourtant des infrastructures vitales pour les sociétés modernes. Les travaux que nous prévoyons participeront à une meilleure connaissance de l'impact sanitaire de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques.

Parallèlement à ce premier point où l'interaction des champs électromagnétiques avec les personnes est perçue essentiellement de manière négative, il convient de souligner que ces travaux sont porteurs d'améliorations de techniques existantes ou de la création de nouvelles techniques et ceci dans des domaines très divers liés à la santé (diagnostic, thérapie).

Par exemple, on peut citer les techniques thérapeutiques comme le traitement de tumeurs par hyperthermie électromagnétique radiofréquences qui, bien calibrée, ne génère que peu d'effets secondaires. La maîtrise de l'électroporation des cellules permettra la mise au point de méthodes élégantes de traitement ciblé de cellules en injectant de manière très locale les molécules actives. A plus long terme l'électroporation peut apporter également sa contribution aux méthodes de thérapie génique.

Les applications dans le domaine de l'ingénierie écologique ne seront pas en reste. Si les propriétés bactéricides, notamment dans les liquides, des champs électromagnétiques pulsés sont connues, de nombreuses applications jouant sur des effets plus complexes que la lyse cellulaire peuvent être développées dans les sols. Il s'agit de traitement de biodépollution des sols par action sur les paramètres biotiques et abiotiques et présentant une efficacité énergétique intéressante.

## Collaborations envisagées

De nombreuses collaborations sont déjà engagées dans le cadre de contrats en cours ou de réponses à des appels d'offre. Elles se poursuivront car elles sont en parfaite adéquation avec notre projet scientifique.

La dosimétrie est développée en collaboration avec différents partenaires suivant les aspects considérés. La variabilité et les aspects statistiques sont traités avec l'équipe Nachos (INRIA Sophia-Antipolis) dans le cadre du projet Santé/Radiofréquences, la précision des calculs dans la dosimétrie basse fréquence est étudiée en collaboration avec EDF-DER (Services "CEM" – Renardières et "Calcul" - Clamart), les nouvelles techniques de maillage Eléments Finis de géométries humaines font l'objet d'une thèse avec le laboratoire CREATIS. Des échanges sont également en cours sur cette problématique de maillage avec le laboratoires LIRIS et LBMC. De même le CETHIL est notre partenaire pour la dosimétrie électromagnétique-thermique en radiofréquences.

L'activité modélisation de la cellule se fera en collaboration avec XLIM (Ph. Lévêque), Institut Gustave Roussy (Lluis Mir), l'IPBS (Justin Tessié) et l'équipe Edam (Tarek Mounir). Nous collaborons également avec une équipe de l'INRIA de Bordeaux sur la mise au point de modèles asymptotiques de membranes biologiques ou non.

Les activités liées au développement de microsystèmes sont menées en collaboration avec différents laboratoires essentiellement de la région Rhone-Alpes qui a une forte activité dans le domaine des micronanotechnologies. Nous collaborons avec le G2Elab et l'Institut Néel pour les systèmes de manipulation de cellules par magnétophorèse ou de cellules ayant internalisé des nanoparticules magnétiques avec le Laboratoire MATEIS. Nous sommes associés à l'INL pour ses compétences en microfluidique dans le cadre de la conception de systèmes d'électrofusion et au LMI dans le cadre de l'ANR HPAC pour réaliser l'alignement de nanoparticules dans des photocatalyseurs.

## Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet

Compte tenu des objectifs que nous nous sommes fixés et des moyens dont nous disposons actuellement au niveau de la plateforme de microbiologie, nous avons besoin d'améliorer nos moyens d'observation au niveau de la cellule élémentaire. En particulier, la validation des modèles d'électroporation demande, dans l'idéal, une méthode de visualisation de la dynamique de formation des pores et/ou des répartitions de potentiel. Il existe des moyens indirects, par mise en évidence de pénétration de colorant mais qui restent relativement sommaires.

## Mot du responsable(s)

La période qui vient de s'écouler montre que les chercheurs de ce groupe ont su très souvent faire émerger des axes de recherches originaux. Ces démarches innovantes et pluridisciplinaires se heurtent pourtant à deux difficultés qui ont la même origine:

- le recrutement de jeunes chercheurs (master, doctorants) dans des domaines qui apparaissent, malgré les enjeux qui y sont attachés, comme étant à la marge des formations universitaires
- la difficulté à répondre à des appels d'offres dans des domaines qui sont identifiés comme appartenant soit au médical, soit à la biologie...

A ce titre, l'enjeu du futur quadriennal qui vient est important pour ce groupe venu d'horizons thématiques variés du Génie électrique, qui doit acquérir une reconnaissance plus large au niveau international dans un contexte qui devient de plus concurrentiel.

## Groupe "Génomique Microbienne Environnementale"

**Objectif général** : étudier les mécanismes d'adaptation bactérienne par des approches de (méta-)génomique

Positionnée à l'Ecole Centrale de Lyon dans une unité qui relève de l'institut du CNRS INSTII, le groupe « Génomique Microbienne Environnementale » va naturellement majoritairement inscrire ses activités dans le domaine en émergence de la bioingénierie. La bioingénierie se définit comme l'implication de l'ingénierie dans le domaine des Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement. Dans ce dernier domaine qui nous concerne le plus, la bioingénierie que l'on peut alors qualifier d'ingénierie écologique concernera la manipulation *in situ* de systèmes écologiques (quelques individus, des populations, des communautés, des écosystèmes). Les objectifs concernent alors la gestion des milieux (réhabilitation d'écosystèmes dégradés, épuration des eaux par les microorganismes) et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels (création de nouveaux écosystèmes durables qui ont une valeur pour l'homme et pour la biosphère), inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques. Nos spécificités tiennent du fait que nos objets d'étude sont des microorganismes et plus particulièrement les procaryotes dans les relations qu'ils peuvent avoir entre eux et avec leur environnement que celui soit de nature biotique ou abiotique. Il nous est cependant apparu essentiel d'ancrer le développement des applications relevant de l'ingénierie écologique sur des bases fondamentales fortes qui, dans le domaine de la microbiologie environnementale restent encore largement à établir. Ce domaine est cependant en évolution rapide du fait du développement des approches métagénomiques et de séquençage à haut débit et nos objectifs pour ce prochain quadriennal seront d'exploiter ces possibilités technologiques pour aborder sur un plan fondamental l'étude des mécanismes d'adaptation et d'évolution bactérienne en relation les plus étroites possibles avec les applications en ingénierie écologique.

**Mots-clef** : adaptation bactérienne, évolution des génomes, métagénomique, sols, transfert horizontal de gènes, analyse de séquences, phylochips, évolution moléculaire, bioinformatique, banques de gènes, ingénierie écologique.

### Structure et compétences du groupe

#### Structure du groupe

Il n'y a pas de structuration particulière pour ce groupe. Il est dirigé par un responsable assurant le lien avec l'autre groupe du département « Bioingénierie ».

#### Compétences du groupe

Génomique Bactérienne, Microbiologie, Ecologie microbienne, Biologie moléculaire, Bioinformatique, Evolution moléculaire, Biologie évolutive, Métagénomique, transfert horizontal de gènes. Le groupe est particulièrement reconnu pour ses compétences dans les technologies liées à la métagénomique, aux puces à ADN taxonomiques (phylochips), à l'exploitation des données issues des dernières technologies de séquençage (454).

### Perspectives de recherche

#### Contexte

Les microbes et plus particulièrement les *Bacteria* et les *Archaea* sont à la base de la vie sur terre qu'ils colonisent depuis plus de 4,5 milliards d'années. De fait, la vie sur terre est complètement dépendante de ces formes de vie microscopiques et nous-mêmes, êtres humains ne pourrions survivre sans la riche diversité de bactéries présentes dans notre corps et dans notre environnement. Quand on compare les différents écosystèmes de notre planète le sol apparaît comme l'habitat comportant le niveau de diversité bactérienne par unité de masse ou de volume le plus important. Les communautés microbiennes du sol régissent les grands cycles géochimiques, interagissent positivement et négativement avec les plantes et en assurent leur croissance, dégradent la matière organique et les polluants chimiques. Les microorganismes se positionnent donc comme des acteurs clés dans pratiquement toutes les opérations relevant de l'ingénierie écologique. Cependant, leur exploitation en Ingénierie Ecologique est forcément encore limitée par le manque de données sur leur

vulnérabilité, la façon dont ils s'adaptent aux perturbations environnementales causées par l'homme, au changement climatique, à l'exploitation des sols. Des travaux réalisés sur quelques isolats témoignent du potentiel adaptatif considérable des microorganismes, avec des représentants se développant dans des conditions environnementales extrêmes et des projections indiquent qu'il y a mille fois plus d'informations génétiques dans un seul gramme de sol que dans un génome humain.

Quoique sols et sédiments représentent certainement le plus important réservoir de diversité bactérienne de la planète, seule une très faible proportion a pu être étudiée, limitée aux 0,5% capables de se multiplier *in vitro* et la séquence complète du génome n'a été réalisée que sur quelques uns de ces isolats. Tout reste donc pratiquement à découvrir. L'étude des dimensions temporelles et spatiales de la structure des communautés ainsi que celle des profils complexes d'expression des gènes qui sous-tendent les interactions trophiques microbiennes est cependant capitale pour d'abord comprendre le fonctionnement des écosystèmes pour dans un second temps exploiter les potentialités microbiennes dans le cadre des programmes d'ingénierie écologique. Ces travaux doivent donc nécessairement aborder les mécanismes de base qui contribuent à l'adaptation et à l'évolution des bactéries et notamment ceux intervenant dans la régulation des variations génétiques et de la spéciation. Le moyen d'y parvenir est d'établir la séquence la plus exhaustive possible des génomes des bactéries du sol, les premières tentatives ayant déjà révélé le niveau incroyablement élevé de plasticité génétique au sein et entre les espèces microbiennes connues amenant à considérer le transfert horizontal de gènes comme la principale force de modelage des génomes, à la base donc des innovations biochimiques. Grâce aux approches métagénomiques combinées à celles du séquençage à haut débit et en appui aux approches conventionnelles, les connaissances fondamentales sur les communautés bactériennes, étapes indispensables à leur exploitation en Ingénierie Ecologique sont appelées à très rapidement progresser.

## Objectif

Comme il l'a été précisé plus haut les objectifs de notre groupe sont l'étude des mécanismes d'adaptation et d'évolution des bactéries principalement dans le sol incluant une exploitation la plus directe possible de ces données fondamentales dans des applications relevant de l'ingénierie écologique. Notre positionnement au sein d'une UMR fortement axée sur différents aspects de l'ingénierie nous permettent, dans le cadre de très efficaces collaborations en interne, de développer des projets pluridisciplinaires qui, comme nous le verrons plus bas concernent tant les volets fondamentaux qu'appliqués de nos travaux.

Du fait des biais caractérisant les approches conventionnelles basées sur la culture *in vitro*, nos approches sont axées sur la métagénomique qui se définit comme l'étude et l'exploration collectives des génomes de toutes les bactéries d'un échantillon accessibles après extraction de l'ADN directement de l'environnement court-circuitant ainsi l'étape de culture *in vitro*. Les dernières avancées en microbiologie moléculaire et robotique combinées aux nouvelles approches de séquençage à haut débit rendent maintenant envisageable le séquençage quasi-exhaustif de l'ensemble des génomes bactériens d'un sol.

Notre principal objectif pour ce prochain quadriennal est de séquencer le métagénome d'un sol de référence, le sol de la station de recherche de Park-Grass à Rothamsted au Royaume Uni pour laquelle existent des relevés climatiques, pédologiques et agronomiques depuis plus de 150 ans. Ce projet de très grande envergure est financé à hauteur de 2,2 M€ par l'ANR (projet Metasoil du programme ANR « Génomique ») et constitue la base du travail d'un consortium international « Terragenome » impliquant une centaine de scientifiques de plus de vingt pays. Le but de cette étude de très grande envergure que coordonne notre groupe tant au niveau national (Metasoil) qu'international (Terragenome) est de fournir les données de génomique seules à même d'appréhender toute la diversité bactérienne tant en termes de populations que de gènes fonctionnels afin de comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes. Ce programme de base sera complété par différentes études ciblant des écosystèmes telluriques particuliers pour révéler, en comparaison avec le sol de Rothamsted, le potentiel adaptatif des communautés bactériennes confrontées aux métaux lourds sur des sites miniers en Nouvelle Calédonie et dans le Gard, à la sécheresse et à des températures élevées en Afrique de l'Ouest, aux composés chlorés sur les sites européens de production des pesticides xénobiotiques, aux organismes génétiquement modifiés dans les champs d'expérimentation des plantes transgéniques. La colonisation des électrodes des piles à combustibles microbiennes développées sur la base des collaborations entre microbiologistes et électrotechniciens de l'UMR Ampère constitue enfin le dernier exemple d'applications des approches métagénomiques sur un environnement (les eaux usées) pour lequel l'ingénierie écologique est fortement sollicitée. Parmi les différents mécanismes adaptatifs bactériens, nous étudierons plus particulièrement le transfert horizontal de gènes (THG) ce qui nous conduira alors à combiner approches génomiques et travaux expérimentaux.

L'utilisation des ressources biologiques, à quelque échelle que ce soit (individu, population, espèce, communauté, écosystème), requiert d'avoir une connaissance approfondie de leur nature et de leur fonctionnement. La diversité spécifique et fonctionnelle des organismes biologiques est définie au niveau de leur génome. Elle repose sur l'existence de mécanismes moléculaires générateurs de variabilité dont les produits sont soumis au double crible de l'environnement et du temps. Les génomes des organismes biologiques témoignent ainsi des forces évolutives qui les ont façonnés. Il est alors possible d'étudier les mécanismes fondamentaux d'évolution des organismes biologiques et de mise en place des structures génomiques à partir d'analyses bioinformatiques de données moléculaires géniques et génomiques disponibles dans les bases de données publiques. Nos travaux visent plus particulièrement à étudier la formation de génomes multipartites chez les procaryotes et les phénomènes de spéciation bactérienne liés au transfert latéral d'ADN et la formation de génome mosaïque. La délimitation de l'« espèce bactérienne » est une problématique incontournable tant pour l'analyse de la diversité microbienne que pour la production de microorganismes synthétiques.

Notre objectif est de lier le plus intimement possible les résultats de ces travaux fondamentaux à des projets d'ingénierie écologique, soit dans le cadre de la mise en place de bio-indicateurs d'un état sanitaire de l'environnement soit par la sélection ou la construction de souches bactériennes pour le traitement de ces mêmes environnements.

### **Perspectives, défis relevés et verrous adressés**

Le sol de par sa communauté microbienne est sans conteste l'écosystème de notre planète qui présente la plus grande biodiversité. La principale limite à son étude et à son exploitation demeure le faible niveau de cultivabilité des bactéries et même la difficulté à en extraire l'ADN métagénomique. Les défis que nous relevons dans le cadre des projets « Metasoil » et « Terragenome » mais aussi dans les autres projets présentés ci-dessous seront de tirer profit des avancées récentes liées à la métagénomique et au séquençage à grande échelle pour lever les verrous technologiques qui limitaient jusqu'à très récemment l'exploration et l'exploitation des communautés bactériennes du sol. Séquencer la totalité d'un métagénome tellurique est sans conteste un projet pharaonique, considérant que la diversité bactérienne est telle que l'effort de séquençage est environ mille fois supérieur à celui nécessaire pour le premier génome humain. Ce défi pourrait même être encore plus important si le nombre d'espèces bactériennes présentant des effectifs très réduits (« the rare biosphere ») est extrêmement élevé comme semblent l'indiquer des données récentes. Seule une mobilisation internationale, combinant des compétences très larges de la pédologie à la bioinformatique est susceptible de permettre de relever un tel défi ; c'est le rôle du consortium « Terragenome » que nous coordonnons.

Les données obtenues sur ce site de référence non contaminé (Rothamsted) permettront en comparaison d'inventorier les mécanismes génétiques adaptatifs de la communauté bactérienne de deux sites miniers particuliers, l'un situé dans le Gard avec des déblais très contaminés en zinc et cadmium, le second en Nouvelle Calédonie où les populations bactériennes sont soumises à des teneurs élevées en nickel (projet ANR CES « Aptitude ») et de sols soumis à la sécheresse et à des températures élevées (projet ANR « SolAO »). L'approche génomique visera à localiser des éléments génétiques mobiles se situant à proximité des gènes de résistance afin d'étudier l'implication des transferts horizontaux de gènes, tant pour la mise en place des déterminants génétiques de résistance que pour leur dissémination au sein de la communauté bactérienne. Ces mêmes problématiques sont aussi abordées dans le cadre de sols de prairies soumis à l'épandage de fumiers contenant des résidus d'antibiotiques ayant servi à traiter les animaux (projets AFSSET et ADEME) ou de champs sur lesquels sont cultivées des plantes transgéniques contenant des gènes marqueurs (projet ANR OGM « Septante »), l'étude des mécanismes de résistance à des antibiotiques et leur dissémination aux bactéries saprophytes du sol puis aux pathogènes de l'homme combinant intérêt fondamental et gestion de ce problème crucial de santé publique que représente la prévalence des microorganismes multi-résistants aux antibiotiques. Le dernier modèle que nous utilisons pour étudier l'implication des THG et de la recombinaison génétique dans le potentiel adaptatif bactérien est lié à la dégradation d'un composé xénobiotique, le lindane (gamma-hexachlorocyclohexane). En effet, différents indices dont la structure en mosaïque du gène impliqué dans l'étape initiale de dégradation, témoignent de l'importance du brassage d'ADN dans la mise en place de cette fonction catabolique. Nous nous proposons de rechercher comment peuvent être régulés *in situ* les échanges horizontaux d'ADN qui, dans le très bref délai d'utilisation de la nouvelle molécule chimique, ont permis à une bactérie d'assembler un nouveau gène fonctionnel ce qui a considérablement accru sa valeur adaptative en présence du contaminant. Approches métagénomiques et technologies expérimentales basées sur le marquage de l'ADN par des nanoparticules magnétiques et la manipulation des cellules transformées par des micro-aimants que nous développons en partenariat avec d'autres groupes de l'UMR (projet ANR CES « Emergent »)

seront mises en œuvre pour répondre à ces questions dont les résultats concerneront aussi bien l'élucidation des mécanismes fondamentaux d'adaptation et d'évolution que la mise en place des protocoles de bioremédiation qui relèvent de l'ingénierie écologique.

### **Pertinence des perspectives et positionnement**

Les communautés bactériennes du sol sont dotées d'un potentiel génétique considérable et de mécanismes adaptatifs extrêmement efficaces qu'il a longtemps été impossible d'étudier et d'exploiter du fait des nombreux biais liés à la récalcitrance à la culture *in vitro* de la plupart des bactéries. Avec les approches métagénomiques s'ouvre une nouvelle ère de la recherche en microbiologie environnementale avec un accès possible de la totalité des populations. Notre groupe a participé depuis le début des années 1990 au développement des technologies d'extraction de l'ADN métagénomique du sol, a donné naissance en 2000 à une entreprise privée pour exploiter ces ressources génétiques nouvellement disponibles. Aujourd'hui, le groupe GME est pionnier en France, en Europe et dans le monde pour appliquer les nouvelles technologies de séquençage à l'ADN métagénomique. Grâce au projet national « Metasoil » et en coordonnant le consortium international « Terragenome » le groupe est appelée à jouer un rôle majeur dans cette nouvelle épopée de la microbiologie. La force du groupe est de pouvoir compter sur ces avancées technologiques, d'en développer de nouvelles comme celles sur le marquage de l'ADN par des nanoparticules magnétiques pour répondre à des questions fondamentales comme l'implication des THG dans le potentiel adaptatif bactérien. Sa force est aussi de chercher à exploiter les données fondamentales pour des projets d'ingénierie écologique, que ce soit en définissant des bio-indicateurs de l'état sanitaire des sols (ou des stations d'épuration) ou en sélectionnant ou construisant des souches bactériennes dotées des fonctionnalités adéquates.

### **Dimensions sociétales des perspectives**

Comme il l'a été montré tout au long de cette notice nos perspectives s'articulent sur une démarche fondamentale très forte pour développer des projets plus appliqués relevant de l'ingénierie écologique. Nos thématiques sont en phase avec les problématiques sociétales, que ce soit pour évaluer l'impact environnemental des plantes transgéniques mais aussi des contaminations par des métaux lourds liées aux activités minières ou des composés xénobiotiques utilisés comme pesticides. Les applications de nos recherches concernent l'utilisation des microorganismes tant comme bio-indicateurs d'un état sanitaire d'un milieu que comme des agents actifs au service de la dépollution. La constitution de l'entreprise LibraGen en 2000 montre également que nos travaux, notamment ceux liés à la métagénomique peuvent avoir des retombées économiques importantes. Le projet « Genefish » que nous développons dans le cadre d'un projet européen de métagénomique pour l'isolement de gènes bactériens codant des enzymes d'intérêt industriel (Metaexplore) 7ème PCRD affiche aussi une vocation économique majeure en proposant le développement d'une souche bactérienne capable de piéger *in situ* par recombinaison homéologue des gènes d'intérêt économique provenant de la microflore indigène. Complémentaire de l'approche métagénomique conventionnelle, Genefish présente l'avantage d'être beaucoup moins lourd à mettre en œuvre et de permettre d'isoler en quelques heures des clones recombinants porteurs des gènes recherchés. Les applications pour la découverte de nouvelles enzymes ou même de nouveaux métabolites secondaires sont très importantes.

Le lancement en 2009 et le soutien par le groupe d'une nouvelle start-up, « Enoveo » en charge de valoriser nos compétences en matière d'estimation de l'état sanitaire des sols et de mise en place des traitements de bioremédiation constituent un exemple supplémentaire des liens que nous désirons conforter entre recherche fondamentale et applications. « Enoveo » s'ouvre également aux thématiques liées à l'énergie en développant des activités dérivant des travaux sur les piles à combustibles microbiennes, notamment pour utiliser ces outils comme des bio-indicateurs des éventuels dysfonctionnements survenant dans les stations d'épuration suite à des contaminations chimiques des eaux usées à traiter.

### **Collaborations envisagées**

Les différentes perspectives présentées ci-dessus requièrent des collaborations importantes à plusieurs niveaux. De nombreux projets ont été développés grâce aux collaborations mises en place au sein de l'UMR sur des compétences en électrotechnique (piles à combustibles bactériennes, simulation de la foudre pour l'étude de l'électro-transformation naturelle), en conception de microsystèmes (marquage de l'ADN par des nanoparticules magnétiques et déplacement des cellules isolées par des micro-aimants), en mathématiques (modélisation et analyse de données de

séquences). La collaboration avec les modélisateurs du laboratoire a permis le développement de programmes permettant la comparaison des séquences métagénomiques et la visualisation graphique des résultats ce qui va déboucher sur l'ouverture prochaine d'un site web actuellement en cours de construction en collaboration avec les chercheurs de l'Université de Clermont-Ferrand .

Ces différents projets justifient totalement l'intégration d'un groupe de microbiologistes au sein d'une UMR déjà riche de compétences variées liées aux sciences de l'ingénieur. Indéniablement, la cohabitation a permis le développement de projets pluridisciplinaires très innovants qui auraient difficilement abouti dans d'autres circonstances.

La confrontation de biologistes et de chercheurs en sciences de l'ingénieur ouvre également de nouvelles voies de développement dans les disciplines respectives de chacun. Ainsi, le projet « Taxis » récemment initié avec des chercheurs du département « Méthodes et Methodologies » de l'UMR, vise à élaborer de nouvelles approches analytiques en évolution moléculaire à partir de méthodes de diagnostic par reconnaissance de forme développées pour le suivi du fonctionnement de systèmes physiques, et inversement, en s'inspirant d'approches bioinformatiques d'étude de systèmes biologiques, à améliorer des méthodes de classification utilisées pour les études de sûreté de fonctionnement des systèmes physiques.

Les collaborations nationales et internationales concernent plus les thématiques conventionnelles des biologistes et sont de plus en plus axées sur l'analyse bioinformatique qui devient le facteur clé des études de génomique et *a fortiori* de métagénomique. Tant au niveau national et notamment au travers des projets ANR mentionnés ci-dessus qu'au niveau international dans les programmes comme « Terragenome » ou « Metaexplore » de nombreuses collaborations avec des groupes de bioinformaticiens français (Université de Lyon, INRA de Jouy en Josas, Genoscope), européens (EMBL) et américains (DOE : Berkeley et Argonne) ont été développées. Ces projets ne doivent cependant pas masquer les autres collaborations qui demeurent fortes tant avec les scientifiques de terrain pour définir les protocoles de prélèvement des échantillons, que les pédologues, les écologistes microbiens, les microbiologistes, les biologistes moléculaires et les experts en sciences humaines et sociales avec qui nous collaborons sur les sujets liés à la résistance bactérienne à des antibiotiques.

### **Moyens nécessaires pour la mise en œuvre du projet**

Nos projets de recherche sont financés par les agences et organismes nationaux (ANR, région Rhône-Alpes, ministère de l'Environnement, ADEME, AFSSET) et internationaux (Europe). Question logistique, l'Ecole Centrale de Lyon qui héberge en partie l'unité Ampère s'est engagée à mettre très rapidement à disposition tous les locaux (bureaux et laboratoires) que nécessite le développement soutenu du groupe. Jeune équipe récemment implantée au sein de l'UMR Ampère à l'Ecole Centrale de Lyon, ses besoins se déclinent plus en termes de moyens humains pour permettre son développement en bonne harmonie avec les projets proposés. Le développement très important des approches métagénomiques et notamment la coordination des différents projets qui s'y réfèrent (Metasoil, Aptitude, Ambasol etc) et le consortium international « Terragenome » nécessiterait l'implication à plein temps d'un ingénieur de recherche. Une demande en conséquence a été faite auprès du CNRS.

### **Mot du responsable**

L'intégration au laboratoire Ampère d'une nouvelle thématique liée à la génomique microbienne environnementale lors du dernier quadriennal constituait un défi important. Le risque était de voir l'érosion de la productivité des microbiologistes dans leurs domaines propres sans développement d'actions pluridisciplinaires avec les autres composantes de l'UMR. Le bilan des activités des quatre dernières années et les perspectives qui en découlent montrent qu'au contraire la pluridisciplinarité de l'UMR bénéficie à toutes ses composantes. L'intégration dans l'unité Ampère n'a pas limité l'efficacité des chercheurs du groupe dans les thématiques relevant de la microbiologie environnementale, la coordination des projets « Metasoil », « Aptitude » et « Terragenome » conférant au groupe «Génomique Microbienne Environnementale » un statut de leader aux niveaux national et international en métagénomique. Le développement ne se limite cependant pas à ces avancées liées aux nouvelles technologies mais concerne également l'étude des mécanismes structurant les populations bactériennes et régulant leurs fonctions, notamment le transfert horizontal de gènes. Initiée sur la base de la simulation de la décharge de foudre dans le sol pour en évaluer l'impact sur l'électro-transformation des bactéries, les collaborations entre biologistes et spécialistes de l'ingénierie se sont rapidement accrues. Deux exemples montrent tout l'intérêt de cette pluridisciplinarité : Le groupe est devenue une référence mondiale sur le développement des piles à combustibles

microbiennes grâce à la collaboration efficace établie entre microbiologistes et chercheurs en électrotechnique. Les mécanismes de colonisation des électrodes par les bactéries électro-actives et la structuration du biofilm qui en résulte constituent une thématique de recherche particulièrement intéressante d'un point de vue fondamental concernant l'adaptation bactérienne mais avec des applications directement envisageables dans les stations d'épuration. Le second exemple est la collaboration avec les chercheurs développant des microsystèmes. Le marquage de l'ADN avec des nanoparticules magnétiques et l'utilisation de micro-aimants pour isoler les cellules transformées va permettre de compléter les approches métagénomiques « conventionnelles » en permettant au groupe d'aborder le domaine en pleine évolution de la génomique appliquée sur une seule cellule isolée. La combinaison des approches métagénomiques par création de banques de plusieurs millions de clones et séquençage des inserts d'ADN, par pyroséquençage de l'ADN directement extrait du sol, par application de la technique « Genefish » et enfin par cette dernière approche de génomique sur cellule isolée permettra au groupe de conforter sa position de leader en génomique microbienne environnementale. Comme il l'a été plusieurs fois répété, ces développements se feront en relation directe avec les applications qui relèvent de la bioingénierie et plus particulièrement de l'ingénierie écologique.