

Micro et nano-technologies, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique

Président

Laurent NICOLAS

Membres de la section

ANDRIEU Joël
 CAMBRONNE Jean-Pascal
 DAMBRINE Gilles
 DAVOINE Jacques
 DUFOUR-GERGAM Elisabeth
 HOLLINGER Guy
 LAUDE Vincent
 MATHIOT Daniel
 MONNERET Serge
 NICU Liviu
 PELLET Claude
 POMMIER Jean-Claude
 RANNO Laurent
 SAGNES Isabelle
 SALZENSTEIN Patrice
 SANCHEZ Jean-Louis
 SAULEAU Ronan
 SEMERIA Marie-Noëlle
 VIVIEN Laurent

Les recherches développées dans la section 08 portent sur les matériaux fonctionnels, ainsi que sur la conception, la fabrication et la caractérisation des composants et des systèmes dans les domaines de l'électronique, de la photonique, de l'électromagnétisme et de l'énergie électrique. La mise en œuvre d'une approche systémique globale, depuis le matériau et sa mise en forme jusqu'à la conception et le développement des systèmes (de puissance, micro- ou nano-), intégrant dès leur conception les spécificités des composants et les architectures nouvelles qui leur sont associées, est également une des spécificités des laboratoires ou équipes rattachées à la section 08. D'une manière générale, l'approche développée relève d'une approche générale d'ingénierie : il s'agit de « comprendre les phénomènes physiques et de les modéliser afin de concevoir des systèmes par nature complexes ». Les recherches menées au sein de la section s'insèrent donc parfaitement dans l'Institut INSIS, et s'appuient sur des recherches à caractère plus fondamental menées par les laboratoires de l'Institut INP (en particulier sections 04 et 06 du Comité National) ainsi que des laboratoires des Instituts INC et INSB. Certains sujets, tels que les systèmes embarqués, les objets communicants, le couplage entre information et mesure physique, la conception de robots et plus généralement toutes les interactions entre logiciel et matériel, sont à l'interface avec l'Institut INS2I.

Ce rapport est structuré en six parties : quatre d'entre elles correspondent aux 4 domaines thématiques couverts par la section (électronique, photonique, électromagnétisme et génie électrique), les deux autres ayant trait aux deux domaines transversaux de la section que sont les nanotechnologies et les micro-et nanosystèmes.

1. Nanotechnologies

Combinées aux nanosciences dont l'objectif est de comprendre les propriétés de la matière structurée à petite échelle, les nanotechnologies visent à élaborer de nouveaux matériaux, dispositifs et systèmes toujours plus petits et performants, en bénéficiant des avantages de propriétés nouvelles (physiques, chimiques ou biologiques) liées à la réduction des dimensions des objets ou dispositifs.

La fabrication des dispositifs nanotechnologiques peut se faire par deux approches complémentaires :

- La première est la voie descendante (« top down ») qui consiste par lithographie, gravure et dépôts, à structurer et connecter des nanoobjets. Elle est mise en œuvre depuis plusieurs décennies par la microélectronique silicium (loi de Moore) et a conduit à la révolution technologique de l'industrie informatique et d'internet.
- La seconde correspond à la voie ascendante (« bottom-up ») qui consiste à manipuler et à assembler des

objets atome par atome ou molécule par molécule pour les intégrer ensuite dans des systèmes plus grands aux fonctionnalités nouvelles. Elle est encore en devenir mais pourrait conduire dans le futur à des révolutions, notamment dans les domaines de la santé et de l'environnement.

En toute rigueur, les nanotechnologies ne devraient correspondre qu'à la réalisation et à la manipulation d'objets ou composants de dimensions nanométriques. Cependant, par extension, on parle de nanotechnologies lorsqu'au moins une des trois dimensions de l'objet ou du composant est de dimensions comprises entre 1 et 100 nm. Les « nanos » couvrent donc globalement le domaine de ce qu'on appelait encore récemment les « micro-nanotechnologies ».

Les principaux champs scientifiques et technologiques sont la microélectronique (systèmes sur puce, nanoélectronique, électronique de spin, ...), la photonique (nanosources de lumière, circuits intégrés photoniques, microsystèmes optiques), les nanomatériaux (nanoparticules, boîtes quantiques et nanofils, surfaces nanostructurées ...), la chimie (édifices supramoléculaires, biomimétisme, ...) et la biologie.

Dans tous ces domaines, les défis sont nombreux. Il faut d'abord élaborer, observer et caractériser des objets nanométriques, puis assembler différents types d'objets et de dispositifs de tailles nanométriques pour construire de véritables nanosystèmes. Le développement des nanotechnologies doit prendre en compte de nombreux facteurs tels que l'existence d'outils de conception, la fabrication à grande échelle et donc à bas coût, la compatibilité avec les technologies existantes, mais également les impacts sociétaux et environnementaux.

1.1. Phénomènes spécifiques à l'échelle nanométrique

Les véritables ruptures technologiques relèveront de principes de fonctionnement résolument nouveaux exploitant les effets physiques propres aux dimensions nanométriques. Les sciences de l'infiniment petit sont par essence pluridisciplinaires. Il faut donc favoriser et amplifier les recherches croisées permettant de progresser dans les connaissances de base sur les nouvelles propriétés apparaissant à l'échelle nanométrique et clarifier les principes scientifiques et techniques régissant les propriétés des structures, des procédés et des mécanismes aux dimensions nanométriques. Il s'agit donc aussi de favoriser le développement d'outils spécifiques qui permettent la conception, la fabrication et la caractérisation des nanoobjets. A cette fin, les différentes techniques de microscopie à champ proche restent des outils de laboratoire simples et efficaces.

1.2. Nanomatériaux

La structuration de la matière dans le but de modifier ses propriétés physiques est ancienne mais les nanotechnologies permettent l'ouverture d'un champ de recherche immense avec les possibilités de structurations en une, deux et même trois dimensions afin de créer des assemblages de plans, de fils ou de boîtes nanométriques. Cette nanostructuration multidimensionnelle permet d'envisager de très nombreuses applications en

électronique (puits, fils et boîtes quantiques), en optique (modification des indices de réfraction, des couleurs, etc.), dans le photovoltaïque (cellules de 3ème génération) et dans bien d'autres domaines. Il faut donc favoriser les recherches sur les nouveaux matériaux à l'échelle nanométrique, sur le contrôle et la maîtrise de leurs propriétés, en tenant compte non seulement des effets de dimension mais aussi des interfaces. Ces travaux viseront au développement de la modélisation et de la synthèse contrôlée de matériaux nanostructurés aux propriétés bien définies.

Outre la poursuite des recherches sur les semiconducteurs traditionnels, il est recommandé d'explorer les potentialités de nouveaux matériaux (nanotubes de carbone, graphène, ferroélectriques, piézoélectriques, ferromagnétiques, matériaux à changement de phase, composés moléculaires...) et leur intégration hétérogène sur des plateformes (notamment silicium) multi-matériaux.

1.3. Les procédés de nanofabrication

Les techniques de lithographie utilisant des particules accélérées (électrons ou ions) se révèlent très performantes du point de vue de la résolution mais souffrent de leur inaptitude à la fabrication collective en masse. La fabrication collective de nano-objets est toutefois possible par utilisation de la nano-impression, qui présente l'avantage de dupliquer à faible coût des motifs de quelques nanomètres sur de grandes surfaces, ou par lithographie X, technique nécessitant une instrumentation complexe (EUV : Extreme UV lithography).

A l'échelle du nanomètre, de nombreuses méthodes de fabrication doivent être revisitées. Il est donc primordial de soutenir l'ensemble des travaux de recherche et développement permettant l'émergence de nanomatériaux, nanostructures, nanodispositifs et nanosystèmes fiables, fabricables à grande échelle et donc à bas coût. Seront privilégiées les techniques mixtes associant des approches descendante (top-down) ultra miniaturisée et ascendante (bottom-up). Notons que la fabrication par auto-assemblage ou auto-organisation n'en est qu'à ses débuts et les recherches dans ce domaine pluridisciplinaire doivent être développées. Les architectures associées à ces nano-objets devront tenir compte des dispersions en taille inhérente à ces nouvelles approches.

1.4. Instrumentation et métrologie pour les nanotechnologies

Le développement et l'utilisation à grande échelle des nanotechnologies nécessitent l'utilisation d'une instrumentation et d'une métrologie adaptées. Pour permettre les développements industriels, il faut mettre au point des instruments et des méthodologies garantissant une qualité et une reproductibilité constantes. Il est donc impératif de soutenir les recherches concernant le développement d'une nouvelle génération de moyens de modélisation, de synthèse et caractérisation de matériaux et aussi de fabrication de dispositifs et systèmes. L'augmentation de la densité d'intégration nécessite un accroissement de la vitesse de fonctionnement des composants sur lequel un développement instrumental doit également être entrepris. Ces instruments au sens large

concernent non seulement les laboratoires mais également l'industrie; les possibilités d'automatisation, et les aspects de normalisation doivent aussi être développés.

1.5. Construire de véritables composants et systèmes à l'échelle nanométrique

En utilisant les résultats des travaux fondamentaux et des nouveaux principes issus des nanosciences, il faut favoriser la conception, la fabrication et la caractérisation de nouveaux composants et systèmes pour créer de nouvelles fonctionnalités. Les systèmes et les dispositifs eux-mêmes ne seront pas limités à ces dimensions nanométriques et doivent pouvoir être intégrés dans un monde macroscopique. Ainsi de nouvelles architectures devront être conçues prenant en compte les spécificités et les nouvelles fonctionnalités de ces nanocomposants et nanoobjets.

Dans la majorité des applications, le passage nano-objet individuel à système de nano-objets (nano systèmes) est complexe et ce passage nécessite souvent une technique mixte associant approche descendante et approche ascendante. Cette démarche se heurte à plusieurs difficultés comme le manque de méthodes et d'outils de conception, en particulier lorsque les systèmes associent des éléments organiques, inorganiques voire biologiques. La dimension « système » des nanotechnologies est un passage obligé pour un transfert efficace du laboratoire vers l'industrie. Elle n'est encore que peu abordée dans les laboratoires académiques alors que les retombées potentielles sont considérables. Il est donc important de soutenir les recherches sur les techniques de conception des nanosystèmes.

1.6. Stratégie de recherche : programmes et équipements

Quels que soient les domaines applicatifs visés, les travaux de recherche en nanotechnologie demandent des moyens expérimentaux lourds et des communautés de chercheurs pluridisciplinaires. Le CNRS doit donc encourager le développement de projets interdisciplinaires et la mise en réseaux des plates-formes technologiques permettant le développement de ces projets.

Parmi les domaines à favoriser, citons :

- les outils unifiés pour la modélisation, la simulation et la conception de nano systèmes ;
- les outils pour la nanofabrication incluant les problématiques industrielles telles que la reproductibilité, le contrôle des procédés et les possibilités de co-intégration avec les technologies existantes ;
- le transfert vers l'industrie des travaux des laboratoires en supportant la création de groupes de recherches pluridisciplinaires associant des chercheurs et universitaires mais également des personnels de la R&D industrielle.

Devant l'importance des défis à relever, il est important de maintenir et d'améliorer la compétitivité des moyens mis à la disposition des chercheurs. Il faut à la fois favoriser la localisation d'équipements spécialisés dans les meilleurs laboratoires du domaine et le développement des plates-

formes qui sont à la disposition de la communauté nationale. La France a mis en place un réseau de Grandes Centrales de Technologies possédant des moyens lourds pour l'élaboration et l'intégration de nanodispositifs ainsi qu'un réseau de centrales spécifiques de proximité, plus orientées nanosciences, ayant des équipements plus légers souvent spécifiques. Toutes ces Centrales sont rattachées à des laboratoires de recherche en nanosciences et nanotechnologies et leurs chercheurs participent activement aux recherches en technologie. Un développement cohérent du parc instrumental et une meilleure synergie entre les différents types de centrale sont nécessaires.

1.7. Les enjeux économiques et sociétaux

Les enjeux économiques des nanotechnologies sont importants. La microélectronique silicium tire depuis quarante ans l'industrie des semiconducteurs. Cette tendance devrait se poursuivre. Cependant on assiste aujourd'hui à une convergence des technologies : l'électronique, l'optique, la chimie, la biologie sont combinées. Les « puces électroniques », les microsystèmes et les microcapteurs se diversifient avec l'ajout de plus en plus de nouvelles fonctions. Les applications potentielles sont immenses et permettront des mutations ou des avancées dans les grands secteurs économiques : l'industrie des Semiconducteurs et de la Microélectronique, les Télécommunications, l'Energie, la Santé, la Biologie, le Contrôle industriel, les Transports, la Défense, l'Environnement, etc....

Ces développements ne sont pas sans poser de nombreux problèmes éthiques et sociétaux. Les nanotechnologies, comme toute nouvelle technologie émergente, peuvent présenter des risques mais aussi apporter des progrès importants, notamment en termes d'économie d'énergie ou de progrès médical. Pour une bonne acceptation sociale, les nombreuses applications envisagées dans les différents secteurs industriels doivent satisfaire aux exigences de protection de la santé, de la sécurité des consommateurs et de l'environnement, et cela de manière transparente.

Il est donc important de développer des activités de recherche ayant pour objectif l'étude des répercussions et implications des nanotechnologies dans la société (avantages, risques) :

- Impact du développement des nanotechnologies sur l'environnement, la santé, la sécurité et évaluation de leurs conséquences ; intégration des risques à toutes les phases de développement des technologies, de la recherche amont jusqu'à l'exploitation commerciale.
- Identification et mesure des conséquences sur la société au sens large : répercussions sociales éthiques et légales, répercussions économiques sur l'emploi.
- Impact sur les méthodes d'enseignement et sur l'éducation scolaire et universitaire ainsi que sur l'information du grand public.

2. Micro- et nanosystèmes

Un micro-nanosystème peut se définir comme un système dont au moins une composante fonctionnelle est

à l'échelle micro-nanométrique. Le vocable « système » sous-entend que l'on peut interagir de manière contrôlée sur son fonctionnement. Depuis quelques années, la miniaturisation extrême des micro-nanosystèmes est à l'origine de véritables révolutions dans un ensemble de domaines, qu'ils soient d'ordre appliqué ou fondamental. Les techniques de fabrication collective associées à une réduction en taille permettent en effet de réduire les coûts de fabrication, offrent la possibilité d'effectuer en parallèle un grand nombre d'opérations, accroissent les performances (augmentation de la sensibilité, réduction de la durée d'un test par exemple). En outre, l'ajout de fonctionnalités électroniques rend ces systèmes automatisables et dans certains cas autonomes.

2.1. Les matériaux et procédés

L'innovation dans le domaine des matériaux et des procédés spécifiques de fabrication conditionne de manière déterminante le développement de nouveaux composants et de nouvelles fonctionnalités. Rappelons les avancées importantes rendues possibles par l'avènement de la gravure réactive profonde du silicium, du nanoimprinting (nano-impression), de la soudure de substrat. Ces procédés devront être compatibles avec de nouveaux type de substrats (souple, organique, hétérogène, fibré, biologique ...) et permettre l'intégration de « nouveaux » matériaux fonctionnels (semiconducteurs, quasi-diamant, piézo-électriques, magnétiques et piézorésistifs, métaux superélastiques, matériaux magnétostrictifs, polymères actifs, matériaux biologiques, matériaux élasto-optiques et thermoélastiques,...). Ces matériaux se présenteront sous la forme de films minces, ultraminces, poreux, sous forme de fils, de tubes, de pointes, de particules ...

Les technologies d'assemblage devront particulièrement être développées afin de permettre le transfert de films minces ou de microdispositifs, l'encapsulation, la fonctionnalisation /traitement/greffage de surface, le micro/nano-usinage et la structuration de surface.

En parallèle, des technologies génériques « standards » et ouvertes ainsi que des technologies permettant une intégration ou une hybridation de l'électronique (ex : above IC, technologies CMOS, flip-chip,...) doivent impérativement être étudiées, développées et/ou exploitées. Le futur CMOS en-deçà de 22nm est délicat et l'une des voies pour l'intégration ultime de systèmes est l'intégration 3D nécessitant le développement des technologies de réalisation de via (Through Silicon Via), d'amincissement et d'assemblage de substrat permettant d'empiler les puces et les niveaux de substrats les uns sur les autres. Elle nécessite également le développement de nouveaux matériaux pour les connexions (nanotubes de carbone, nouveaux diélectriques d'isolation ...) et de nouvelles technologies pour les interconnexions à pas très faible. Ces procédés devront de plus être « basses températures » pour être compatibles avec la plupart des structures à interconnecter.

2.2. Le micro/nanopackaging

Il s'agit d'un point clé concernant les MEMS (Micro Electro-Mechanical System) qui nécessite de considérer le système dans sa globalité du point de vue du composant

élémentaire, des connexions électriques, des sources d'énergie et composants de stockage, des interconnexions et de la protection mécanique. Peu d'équipes en France travaillent sur cette thématique qui a longtemps été développée uniquement par les industriels du domaine. Le packaging représente cependant 80% du coût de revient du produit final et 80% des causes de défaillance. Le packaging des MEMS est en effet une problématique complexe. Les parties mobiles sont mécaniquement très fragiles et nécessitent souvent de fonctionner dans un vide relativement poussé dans le cas des systèmes vibrants (<10⁻² mbar). De plus, les environnements sont souvent hostiles ou spécifiques (MEMS implantables par exemple).

La résolution de ces problèmes nécessite de manière urgente des travaux de recherche sur les procédés d'encapsulation et d'assemblage à faible budget thermique, par transfert de films, sous vide en incluant des matériaux « getters » par exemple, d'assemblage hétérogène, d'assemblage temporaire, auto-aligné ou auto-assemblé, sur l'intégration de la connectique (électrique, fluide, optique), sur le packaging intelligent, sur la modélisation de l'influence du packaging (mécanique, thermique, électrique), sur les méthodes de caractérisation, de test et d'analyse de la défaillance ex-situ et in-situ (mécanique, thermique, environnement interne, électrique) et des études de fiabilité.

2.3. Les micro/nanocomposants

Les domaines d'application des MEMS/NEMS (Nano Electro-Mechanical System) sont extrêmement nombreux. Mais, si certains composants sont actuellement produits en très grand nombre (accéléromètres, capteurs de pression, micromiroirs ...), la plupart d'entre eux restent encore limités à des développements académiques notamment en ce qui concerne les NEMS. La principale cause réside dans le fait que le composant fonctionnel peut rarement être limité au simple développement du dispositif pour la fonction. Il doit être conçu, réalisé, testé et implémenté dans un environnement plus complexe constituant le « système » et incluant l'intégration des sources d'énergie, les connexions électriques, les interconnexions, le packaging etc... Nous discuterons ici du composant en termes de générateur de fonctionnalité et non comme un micro/nanosystème fonctionnel.

Composants pour les communications

Deux voies sont possibles pour les communications : la voie hertzienne dédiée aux liaisons faibles et moyens débits et la voie optique plus spécifiquement utilisée pour les liaisons haut débit. Ces deux modes de communications utilisent des MEMS, les RF MEMS dans le premier cas et les MOEMS (Micro Opto-Electro-Mechanical System) dans le deuxième. Dans le domaine des RF MEMS, la principale avancée concernera l'intégration des microcapacités et des microinductances, leur montée en fréquence, ainsi que leur accordabilité qui est relativement répandue pour les capacités mais encore très originale et peu fiable pour les inductances.

Le développement des outils technologiques de microfabrication devrait permettre de continuer ces avancées et d'induire une amélioration notable des

performances comme l'augmentation du facteur de qualité pour les systèmes résonants par exemple (avec la compréhension des mécanismes de perte de surface et de volume, la modélisation de l'amortissement visqueux, le développement de géométries complexes) ou l'utilisation des métamatériaux.

Pour les liaisons haut débit, l'association MEMS et nanophotonique/phononique permet d'envisager des composants accordables multi-fonctions basés sur des phénomènes interférométriques ou de diffraction et pouvant potentiellement travailler à plusieurs GHz et mettant en œuvre des déplacements contrôlés à l'échelle nanométrique.

Enfin, il est indéniable que dans le domaine plus particulier des communications, l'apport des nanostructures (nanotubes, nano-fils,...) aura un impact important. Tant du point de vue de la miniaturisation que de l'apport des nouvelles fonctionnalités offertes, tant au niveau du composant que du circuit voire du système, l'exploitation des nanotechnologies ouvre des perspectives de nouvelles architectures complexes qui restent à découvrir pour les futurs systèmes de communication.

Il est dès lors nécessaire de :

- Poursuivre les efforts de développement de technologies et de composants élémentaires en mettant l'accent sur les aspects de fiabilité et de packaging,
- Développer la recherche au niveau « systèmes » de communication pour tirer profit des développements au niveau composants.

Capteurs chimiques ou biologiques / Microfluidique

La spécificité de ce type de détecteurs est que la plupart des interactions chimiques ou biologiques ne sont généralement réalisables qu'en phase liquide. Les avancées extraordinaires dans ce domaine n'ont pu avoir lieu que grâce au développement simultané des études conceptuelles et technologiques dans le domaine de la microfluidique. Ces capteurs doivent être également généralement « bas coût », stérilisables et jetables (ou réutilisables).

Le principal objectif est généralement de coupler la spécificité de reconnaissance et l'extrême sensibilité de la mesure induite par le faible volume d'échantillon collecté. Ceci est en partie réalisé en parallélisant les systèmes de détection, en intégrant plusieurs microcapteurs sur la même puce et en fonctionnalisant les surfaces. Mais l'objectif de détecter la molécule unique est loin d'être atteint et l'exploration de nouvelles voies de détection ou de transduction doit être abordée. Dans le domaine de la microfluidique, l'exploitation des phénomènes di- et triphasiques semble particulièrement intéressante et parfaitement adaptée à la miniaturisation et à la fiabilité des systèmes.

Il est également indispensable de développer des systèmes intégrés permettant la préconcentration, l'immobilisation, le tri de nanoparticules, la collection d'échantillons et la détection sur la même puce. Dans ce souci d'intégration, l'utilisation de systèmes communicants et l'utilisation de microsources d'énergie miniaturisées paraît tout à fait indispensable, notamment dans le cas de capteurs ou actionneurs implantables.

Les microsources d'énergie

Un point majeur à considérer dans la conception du MEMS est sa consommation énergétique qui doit toujours être minimisée. Actuellement, la miniaturisation de la source énergétique constitue un verrou pour l'intégration ultime de microsystèmes autonomes. Plusieurs types de sources sont étudiés comme les MEMS « de puissance » (du milliwatt à quelques Watts), les microturbines, les micropiles à combustible, microbatteries, micromachines thermiques (comme les microchambres à combustion couplées à un actionneur et un générateur). D'autre part, il faut également citer les sources de faible puissance (nanowatt au milliwatt) comme les systèmes permettant de récupérer l'énergie mécanique issue des vibrations naturelles par exemple. Les avancées technologiques dans le domaine des matériaux (synthèse et nanostructuration) sont tout à fait déterminantes pour cette thématique. Le redressement, l'amplification et le stockage des grandeurs générées sont également un enjeu de tout premier plan.

Microcapteurs physiques

La sensibilité, la dynamique de mesure, la bande passante et l'insensibilité à l'environnement des capteurs devront être globalement augmentées. Cette analyse multicapteurs pourra être comparée à l'utilisation d'un seul capteur reconfigurable présentant une électronique de détection, commande et test sûrement plus élaborée. Les microcapteurs en « environnement sévère » doivent particulièrement être développés.

Micro/nanorésonateurs

Il est nécessaire d'ouvrir le champ d'application des résonateurs (montée en fréquence ou large bande) en augmentant la qualité des microdispositifs (stabilité, coefficient de qualité...) et en maîtrisant les mécanismes d'amortissement, de couplage et de fatigue. Les performances des nanorésonateurs utilisant des nanotubes ou nanofils sont tout particulièrement prometteuses.

2.4. Architecture système et conception

Il est maintenant convenu que les microsystèmes devront aborder de plus en plus les approches « systèmes » considérant le composant et sa technologie dans leur globalité. Pour cela, il est nécessaire de développer différentes approches complémentaires. La première consiste à disposer d'outils de conception et de prédiction du comportement du microsystème, de sa durée de vie et de sa fabrication. Les travaux doivent viser à obtenir une conception plus robuste (plus insensible aux variations de la technologie et de l'environnement) et plus prédictive en terme de performances et de fiabilité. Ceci nécessite le développement de méthodes de conception plus globales intégrant par exemple l'électronique, le test, la fiabilité et les effets de l'encapsulation (packaging). La deuxième consiste à développer des outils de conception et de modélisation multiphysique pouvant être validés par des dispositifs ou véhicules expérimentaux de test dédiés. La troisième consiste à renforcer le développement de la conception comportementale (langage VHDL-AMS). Enfin, il semble

important de mener des travaux pluridisciplinaires entre physiciens, électroniciens, automaticiens et informaticiens pour les aspects commande et intelligence embarquée.

2.5. Test/Sureté de fonctionnement / Fiabilité

Les études de fiabilité de MEMS concernent le développement de la connaissance des mécanismes de défaillance et l'utilisation de cette connaissance pour établir des modèles prédictifs. C'est à ce jour le premier frein à l'industrialisation des MEMS et d'autant plus des NEMS. La principale difficulté vient de la très grande diversité des matériaux et des procédés technologiques utilisés (les caractéristiques des films minces dépendent des techniques et des conditions d'élaboration et ces caractéristiques peuvent évoluer au cours du procédé de fabrication du dispositif, mais aussi dans le temps ou différer d'un dispositif à un autre). Le manque de techniques reconnues pour la caractérisation des MEMS et le manque de standardisation quant à la fiabilité constituent également des verrous importants. La fiabilité prédictive est donc encore une thématique tout à fait balbutiante qu'il faudra à tout prix développer dans les prochaines années.

Concernant la caractérisation, il s'agit de développer des méthodes de mesure et des véhicules de test spécifiques (à différents stades du procédé de fabrication) et des méthodes d'extraction associées permettant de caractériser des paramètres fonctionnels liés à des matériaux, à des composants élémentaires ou à des systèmes ou sous-systèmes. Il s'agit alors de développer les méthodes les plus rapides et les plus universelles possibles. Elles devront également permettre une détection très localisée notamment pour les NEMS.

Enfin, concernant le test, il devra être effectué à différents stades de réalisation du système final, tout d'abord sur tranche afin de déceler les puces défaillantes, ensuite après l'étape de packaging qui peut avoir introduit des contraintes mécaniques et des modifications physico-chimiques des surfaces. Il conviendra alors de qualifier le packaging des MEMS et de corriger ses effets sur les performances du MEMS en convenant de procédures de calibration initiales ou en cours de fonctionnement.

2.6. Impact sociétal

La démarche du scientifique dans le domaine des nanosciences et tout particulièrement dans le développement des MEMS et NEMS doit s'accompagner d'une démarche éthique concernant l'utilisation des microcapteurs et microactionneurs développés. La toxicité des matériaux synthétisés ou utilisés ainsi que celle des procédés utilisés doit également être un souci constant.

3. Photonique

La photonique regroupe les activités liées à la lumière et au contrôle de l'interaction entre lumière et matière. C'est un domaine de recherche à fort impact sociétal, qui apparaît aujourd'hui comme une thématique clé pour les technologies de l'information, les sciences du vivant ou les technologies vertes. On assiste également à

l'avènement de circuits performants alliant photonique et électronique ou bien encore photonique et biologie, ceci dans le but d'apporter de nouvelles solutions pour favoriser un développement durable, économe en énergie.

A travers la photonique, il s'agit de développer et de mettre en œuvre de nouveaux concepts liés à l'utilisation de matériaux massifs ou encore d'objets individuels, au contrôle ultime de la lumière en exaltant par exemple l'interaction lumière-matière, à la conception de systèmes innovants dans le domaine de l'imagerie, de la spectroscopie, des références temps-espace, ou à la mise en œuvre de nouveaux protocoles tels que ceux rencontrés dans les communications quantiques. Il s'agit également de développer des composants et circuits optimisés, miniaturisés, économes en énergie, fonctionnant dans des domaines spectraux allant de l'ultra-violet à l'infra rouge lointain. Une des clés des futurs développements en photonique sera sans doute la structuration de la matière à l'échelle des longueurs d'onde utilisées ou à des échelles inférieures, ainsi que l'utilisation des propriétés des objets de taille nanométrique comme les nanostructures semi-conductrices ou métalliques. Les développements actuels de la photonique se positionnent ainsi au cœur des nanosciences et des nanotechnologies

3.1. Matériaux

La mise au point de nouveaux matériaux constitue un enjeu majeur pour le développement d'une nouvelle génération de composants aux performances améliorées, ou offrant de nouvelles fonctionnalités. De nombreuses perspectives sont identifiées dans ce domaine. Elles s'appuient notamment sur de nouvelles filières de matériaux qui permettent d'accéder à des propriétés physiques jusque là peu explorées. On peut notamment citer les semi-conducteurs, les semi-conducteurs poreux, « naturellement » nano, meso ou microstructurés, permettant à la fois le confinement d'électrons, de phonons et de photons, les céramiques polycristallines fonctionnelles et les nouveaux cristaux, les photopolymères, les boîtes et puits quantiques, les nanoparticules et en particulier les formes allotropiques du carbone comme les nanotubes de carbone, le nanodiamant, le graphène.

La nanostructuration de la matière constitue une autre grande tendance du domaine. En effet, l'intégration d'une structure sub-longueur d'onde au sein de composants et dispositifs photoniques permet d'atteindre un contrôle ultime de la lumière, à la fois dans le domaine spatial (confinement extrême de la lumière) et dans le domaine temporel (contrôle du temps de stockage des photons). Plusieurs axes de recherche sont aujourd'hui identifiés comme particulièrement prometteurs :

- les structures plasmoniques, exploitant des nanostructures métalliques,
- les couches minces optiques,
- les cristaux photoniques,
- les métamatériaux,
- les fibres optiques nanostructurées.

3.2. Génération, détection, contrôle de la lumière

Les composants de base sont souvent à l'origine

des ruptures technologiques et un effort important de recherche doit être consacré à cette thématique qui permettra de faire émerger de nouvelles applications.

Dans le domaine des sources, il s'agit notamment de faire progresser les performances des technologies laser avec en particulier les lasers à semi-conducteurs (diodes et laser à cascade quantique), les lasers solides s'appuyant sur les nouvelles filières de matériaux et les lasers à fibre. La génération de lumière intègre également toutes les recherches menées sur les diodes électroluminescentes, à base de matériaux semi-conducteurs ou organiques, qui répondent à d'importants enjeux dans le domaine de l'éclairage par exemple.

Avec le fort développement des différentes techniques d'imagerie et des nouvelles approches pour le transport et le traitement de l'information, un besoin important est exprimé pour de nouveaux photodétecteurs. Les enjeux scientifiques sur ce sujet sont les suivants :

- Photodétecteurs rapides à bas bruit pour les télécommunications haut débit,
- Compteurs de photons à haut rendement quantique et faible taux d'obscurité, adaptés aux systèmes d'information quantique,
- Matrices de photodétecteurs dans différentes bandes spectrales (visible, proche infrarouge, infrarouge thermique et THz) à grand nombre de pixels, offrant une haute sensibilité,
- Détecteurs « intelligents » reposant sur l'utilisation de nouveaux circuits de lecture capables d'offrir de nouvelles fonctionnalités au niveau du composant.

3.3. Transport et traitement de l'information par voie optique

Les besoins dans le transport et le traitement de l'information sont de plus en plus grandissants que ce soit à l'échelle d'un circuit intégré CMOS ou pour des transmissions à plus longue distance.

Dans le cadre des télécommunications optiques, le transport et le traitement de l'information se trouvent à un tournant caractérisé par la forte demande en capacité liée à l'explosion du trafic internet. L'accès 'large bande' et très haut débit (> 1 Gbit/s) à base de fibre optique chez l'abonné est devenu une réalité, impliquant le développement de nouvelles approches d'une part pour la transmission optique, mais également de nouvelles technologies aux nœuds du 'futur réseau optique'. De nouvelles techniques de transmission telles que la radio-sur-fibre (RoF) ou l'accès optique en espace libre permettront de répondre à des besoins spécifiques.

Le développement d'un réseau de cœur et d'accès à très haute capacité reposera sur la photonique où l'intégrateur de systèmes saura comment prendre avantage du potentiel de l'optique, dans une approche de plus en plus de type 'boîte noire' à fonctionnalité déterminée.

Le traitement optique du signal est considéré comme la technologie-clé pour des débits de plus en plus élevés (Systèmes intégrés optiques Tbit/s multi-longueurs d'onde) pour lesquels les solutions purement électroniques deviennent impraticables. Différentes fonctions optiques sont requises pour ce type d'application : portes optiques, amplificateurs, interféromètres, circuits de contrôle de la polarisation de la lumière, gestion de la longueur d'onde et

de la dispersion,...

La convergence entre l'optique et l'électronique est une des clés du développement de la photonique du futur dans les systèmes de communications. Cette intégration s'appuiera sur les développements menés en microélectronique sur l'intégration 3D en particulier. Il s'agira de développer de nouvelles approches permettant de générer, de véhiculer, de traiter et de collecter des signaux optiques de faible intensité au sein même, ou à proximité immédiate des circuits intégrés.

Une autre voie est le traitement du signal dans les fibres optiques qui bénéficie de distances d'interaction importantes et s'appuie sur le contrôle de la dispersion et l'ingénierie des propriétés non linéaires du milieu de propagation. Il convient également de progresser dans la fabrication des fibres, notamment nanostructurées, et dans l'exploitation des possibilités offertes par les effets de lumière lente.

Un autre axe très stratégique et complémentaire à la transmission est celui du stockage optique de données qui devra répondre à au moins deux exigences : une durée de vie élevée et une réplique en masse aisée.

Un bon nombre de systèmes hyperfréquence pour l'avionique du futur utiliseront, en majorité, des antennes actives à balayage électronique. Compte tenu des évolutions des systèmes vers les plus hautes fréquences (jusqu'à 100GHz), l'objectif de performances de bande instantanée élevée rend de plus en plus difficile l'utilisation de câbles coaxiaux pour la distribution de signaux hyperfréquence. Pour des avantages liés au poids, volume, flexibilité, bande passante, immunité électromagnétique, la distribution optique des signaux RF dans les antennes à balayage électronique est une voie très prometteuse. La maturité et les performances notamment en termes de rendement de conversion, de bruit, de pureté spectrale et de linéarité des composants optoélectroniques, sont telles aujourd'hui qu'elles permettent d'envisager la transmission et le traitement optique des signaux hyperfréquences pour ces applications embarquées.

Les enjeux scientifiques majeurs de cette technologie peuvent se résumer ainsi :

- Amélioration des performances des liaisons optiques au niveau des composants (réduction de 10dB du facteur de bruit intrinsèque des liaisons optiques)...
- Remplacement des coaxiaux par des liaisons optiques / accroissement des performances des systèmes.
- Réalisation de circuits intégrés photoniques micro-ondes (MPIC : Microwave Photonic Integrated Circuits) par extension des MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuit).
- Développement des nanotechnologies photoniques.
- Etude de la photonique organique pour les signaux RF et haut débit (au delà des technologies OLED – Organic Light Emitting Diode).
- Nouvelles fonctions intégrées opto-hyperfréquences (filtrage, traitement optique des signaux hyperfréquences) qui restent à démontrer.

L'information quantique est une discipline en pleine expansion. Il s'agit de tirer partie des propriétés intrinsèques à la physique quantique afin d'effectuer des tâches impossibles ou difficiles à réaliser à l'aide de ressources

classiques d'information. En effet, la superposition cohérente des états et l'intrication, longtemps restées au niveau de concepts fondamentaux, sont aujourd'hui perçues comme des ressources utiles pour le calcul quantique et les communications quantiques.

Les enjeux sociétaux correspondant à ces thématiques se situent à différents niveaux. Sur le plan fondamental, la photonique offre un potentiel important pour faire progresser la connaissance sur différents sujets comme l'étude des phénomènes de localisation, des propriétés des gaz quantiques ou des phénomènes de décohérence quantique. Sur le plan applicatif, des perspectives très intéressantes sont identifiées avec la cryptographie quantique qui conduira à relativement court terme à des systèmes sécurisés pour le transport d'information, ou les recherches sur les portes logiques et les mémoires quantiques qui constituent des briques technologiques essentielles pour la réalisation d'un ordinateur quantique.

3.4. Imagerie, mesure et instrumentation

L'utilisation de la lumière donne accès à une large gamme de propriétés qui offrent un avantage compétitif certain pour la réalisation de différents types de senseurs et instruments. Le premier domaine d'application des technologies optiques est évidemment celui de l'acquisition d'images. L'imagerie est un domaine foisonnant qui recouvre pratiquement tous les domaines de la physique. Les différents enjeux pour cette thématique peuvent être structurés de la façon suivante :

- Imagerie hyperspectrale et polarimétrique, qui repose sur une analyse fine des propriétés spectrales et de polarisation de la lumière émise par un objet.
- Imagerie pénétrante, qui se développe rapidement grâce aux progrès technologiques observés dans le domaine des composants qui conduit un accès facilité à de nouvelles bandes spectrales (THz, rayons X et τ).
- Imagerie à travers les milieux diffusants avec en particulier l'exploitation ultime des modulateurs spatiaux de lumière, et l'amélioration des techniques instrumentales (tomographie, microscopie non linéaire).
- Nouveaux contrastes de microscopie, en champ lointain (fluorescence multi-photon, génération de seconde ou troisième harmonique, microscopies Raman), ou en champ proche.
- Nanoscopie optique, ou microscopie ultra-résolue (illumination structurée, synthèse d'ouverture, nanoscopies STED, PALM/STORM).
- Nouvelles approches comme la co-conception et la détection compressive, s'appuyant sur une association étroite du capteur et de traitement d'information.

Une bonne part de ces enjeux est fortement liée au développement de sources laser accordables sur de très grandes largeurs spectrales («laser blanc» produit par supercontinuum sur des fibres à cristaux photoniques), comme de sources laser à impulsions ultracourtes.

Les diverses techniques de spectroscopie font également l'objet de nombreux travaux de recherche, qui permettent d'améliorer les capacités des instruments pour la détection de différents types d'espèces biologiques et chimiques. Les enjeux dans ce domaine consistent à aboutir à une

nouvelle génération d'instruments offrant une sensibilité considérablement accrue avec une sélectivité améliorée pour différents domaines d'application (détection de fuites, de polluants, de matières dangereuses).

Enfin, l'utilisation des technologies photoniques est actuellement en pleine effervescence dans les domaines des sciences du vivant (imagerie fonctionnelle de fluorescence ultra-résolue) ou des «mesures extrêmes». Des perspectives scientifiques très intéressantes sont en effet identifiées dans le domaine des horloges de très grande précision, dans la métrologie des fréquences optiques ou des distances. Par ailleurs, le développement des techniques d'interférométrie à ondes de matière conduira à une nouvelle génération de gravimètres et gyromètres qui permettront de gagner plusieurs ordres de grandeur en sensibilité par rapport aux approches actuelles. Il convient également de citer les travaux en matière d'interféromètres optiques ultra-sensibles destinés à la détection des ondes gravitationnelles.

L'impact sociétal de ces activités scientifiques se situe à plusieurs niveaux, notamment dans le domaine de la physique fondamentale. Les prochaines générations d'instruments joueront un rôle essentiel pour la réalisation de différents tests qui permettront d'approfondir notre compréhension des lois physiques de l'univers (effet lense-Thirring, effet Shapiro, test du principe d'équivalence, caractérisation des ondes de gravitation, test de la loi de gravitation). Le domaine de la géophysique bénéficiera également de ces développements, notamment en matière de géodésie relativiste, via la caractérisation fine du champ de pesanteur et des fluctuations rapides de la rotation de la Terre.

Des retombées importantes de ces recherches sont également attendues dans le domaine applicatif et il est clair que les performances de pointe rendues accessibles par ces recherches trouveront naturellement des débouchés dans différents secteurs. On peut par exemple citer le domaine de la radionavigation qui nécessite des références temporelles ultraprécises. Certaines applications de défense sont également susceptibles d'être concernées avec des besoins exprimés en termes de datation-synchronisation des systèmes d'information, ou en termes d'accéléromètres et de gyroscopes de très grande précision. Au niveau de l'imagerie pour le vivant, des technologies aussi récentes que le «laser blanc» ou les nanoscopies STED, PALM/STORM, sont déjà disponibles commercialement, illustrant la dynamique importante et très concurrentielle de ce marché.

3.5. Photovoltaïque

Ces dernières années ont été caractérisées par une prise de conscience collective des difficultés engendrées par le réchauffement climatique et la pollution. Depuis, tant à l'échelle mondiale (accords de Kyoto) que sur le territoire national (Grenelle de l'environnement), on assiste à un regain d'intérêt de la population, des politiques, des scientifiques et des industriels pour les énergies renouvelables au sens large et pour l'énergie photovoltaïque en particulier.

Le CNRS a engagé, depuis déjà un certain nombre d'années, des actions en vue de consolider les recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque au sens

large. À l'initiative du programme pluridisciplinaire sur l'Énergie (PIE), il poursuit aujourd'hui son engagement en soutenant les laboratoires via des crédits spécifiques ou l'affichage de postes. En parallèle, le Ministère a créé l'Agence Nationale de la Recherche, dont certains appels d'offres thématiques participent aussi de cette dynamique autour des énergies renouvelables et plus particulièrement de l'énergie solaire appliquée à l'habitat, comme l'ANR « HABISOL » ou le programme « Solaire Photovoltaïque ». L'implication d'acteurs importants tels que le CEA, EDF, TOTAL ou GDF-SUEZ a également contribué à une certaine dynamique pour la recherche. Au niveau européen, certains programmes RTD affichent également clairement des appels spécifiques sur la thématique photovoltaïque, du matériau au stockage.

Les activités de recherche concernent essentiellement des études sur les matériaux pour la conversion, les procédés d'élaboration, la fabrication de composants élémentaires, les modélisations de nouveaux concepts de cellules, ainsi que les problèmes de convertisseurs et de connexions au réseau. Ces recherches concernent essentiellement la section 08, mais également les sections 10, 14 et de plus en plus des sections de l'Institut de Chimie pour les cellules organiques et hybrides.

Les études menées par ces laboratoires peuvent être regroupées en 5 catégories :

- Pour la filière concernant les cellules à base de silicium en plaquettes ou ruban, les activités s'attachent à développer des procédés de fabrication de lingots aussi bien que de nouvelles architectures de cellules (hétérojonction, passivation, contacts en face arrière...) pour améliorer l'efficacité de collecte. L'objectif est un rendement de conversion de plus que 20% sur des cellules de grande dimensions et faibles épaisseurs (<50 µm), et un coût < 1 Euro/Wp.
- Pour la filière couches minces à base de silicium (amorphe a-Si, microcristallin µc-Si, polycristallin pc-Si), il s'agit d'étudier la cristallogénèse du silicium très mince (<2 µm) sur des substrats variés, et de corrélérer les propriétés optoélectroniques et de structure des couches Si formées, et enfin en faire des cellules/modules avec le plus haut rendement et stables.
- Pour la filière couche mince à base de matériaux chalcopyrites (Cu, In, Ga, Se, S) qui présente également un potentiel en haut rendement de conversion et faible coût, les activités de recherche menées concernent la synthèse des couches et cellules, les analyses des interfaces, le développement de structures tandem avec d'autres matériaux pour une exploitation maximale du spectre solaire. L'existence d'une plateforme sur le site R&D d'EDF (Chatou) constitue un atout majeur pour cette filière.
- Pour la filière hybride et organique, il s'agit d'étudier divers matériaux polymères et petites molécules, en les associant ou pas à des matériaux inorganiques (nanocristaux semi-conducteurs, nanotube de carbone, graphène...).

Des actions plus transversales à toutes ces filières sont également en pleine expansion. On peut citer le développement de nouveaux oxydes transparents conducteurs tels que ZnO, qui sont fonctionnalisés (par exemple luminescent) ou pas et qui peuvent servir quelle que soit la filière. Il y a également des recherches dans

l'exploitation des nanomatériaux (boîtes et fils quantiques semi-conducteurs, nanoparticules métalliques) pour l'exaltation de la luminescence et/ou de l'absorption de la lumière ou l'ingénierie de nouveaux matériaux. D'autre part, la structuration de la matière à l'échelle de la longueur d'onde peut apporter des solutions dans l'amélioration de l'efficacité de futures cellules. Enfin, une petite partie de la communauté du Génie électrique est également active du côté des systèmes et de la gestion électrique de l'énergie photovoltaïque.

4. Micro- et nanoélectronique

Que ce soit à domicile, au bureau ou dans les déplacements, la vie moderne est de plus en plus dominée par l'électronique. Depuis plus de 50 ans, le développement des dispositifs microélectroniques, et maintenant très souvent nanoélectroniques, a bouleversé notre mode de vie en proposant un vaste choix de produits et de services. Le progrès technologique rend possible la réalisation de nouveaux objets et fonctions dont certains donnent lieu à des marchés considérables. Depuis des voitures plus sûres et plus respectueuses de l'environnement, en passant par des systèmes de communications fixes et mobiles toujours plus sophistiqués et des équipements multimédia et ordinateurs de plus en plus puissants, jusqu'à des systèmes personnels d'assistance médicale, sans oublier les loisirs, l'éventail applicatif ne cesse de s'élargir et de se diversifier.

Entre recherche et enseignement, production et marché, il y a un cercle vertueux dont le prolongement implique la nécessité de maintenir et développer une recherche scientifique et technologique de haut niveau garante des progrès futurs. Pour être le plus efficace possible, cette recherche doit être structurée et complémentaire des recherches plus appliquées ou industrielles, et, pour bénéficier d'un maximum de synergie, elle doit être menée en interaction avec les organismes correspondants. La recherche à caractère plus académique doit cependant pouvoir également s'appuyer sur des ressources technologiques propres du meilleur niveau. Dans ce contexte, le réseau RENATECH des grandes centrales de technologie pour la Recherche Technologique de Base (RTB), associant le CNRS et le CEA-LETI, joue indéniablement un rôle important et structurant au profit des laboratoires français.

4.1. Composants élémentaires

Le MOSFET ultime

Depuis l'avènement des circuits intégrés en technologie CMOS silicium, les évolutions technologiques se caractérisent par une miniaturisation toujours plus poussée respectant la «loi de Moore». Les principaux défis scientifiques à court et moyen terme pour maintenir ce rythme d'évolution sont régulièrement détaillés dans la feuille de route de la microélectronique («ITRS roadmap») et ne sont donc pas repris d'une façon exhaustive dans ce document. Parmi les principaux verrous nécessitant un investissement particulier, on peut néanmoins citer :

- Le développement des techniques de lithographie optiques ultimes ou alternatives (nano-impression, auto-

assemblage, ...) et les techniques de caractérisation associées.

- Le développement de nouveaux matériaux compatibles «silicium» pour contourner les limites physiques atteintes avec les matériaux traditionnels, par exemple :

- o Diélectriques de grille à très forte permittivité pour des épaisseurs équivalentes d'oxyde sub-nanométriques sans courant de fuite abusif,

- o «Nouveaux» matériaux à très forte mobilité pour le canal (intégration de III-V, Ge, alliages SiGe, ingénierie des contraintes, etc...),

- o Diélectriques à très faible permittivité pour les interconnexions.

- La modélisation physique des structures ultimes (prise en compte des effets quantiques et fluctuations statistiques).

- Le développement de nouvelles architectures de composants non planaire (SOI – Silicon on Insulator - multi-grilles) : modélisation physique et réalisation technologique.

La communauté scientifique française, couvrant un large champ de compétences, est bien positionnée au niveau européen où elle est fortement impliquée dans les principaux programmes du 7ème PCRD. Bien structurés autour des acteurs majeurs (STMicroelectronics au plan industriel et le LETI pour l'intégration «pré-industrielle»), les laboratoires concernés semblent bien armés pour relever les défis de l'accompagnement de la fin de la loi de Moore.

Au delà du CMOS

A terme (fin de la «roadmap» d'ici une dizaine d'années?), la miniaturisation des composants de type MOSFET ne sera probablement plus possible et des solutions alternatives devront être implémentées pour améliorer les performances, si possible compatibles avec la technologie de base de type CMOS.

Pour explorer cet avenir à plus long terme, il est impératif de développer des recherches exploratoires sur les nouveaux matériaux et architectures de composant à mettre en œuvre. Parmi les études semblant les plus prometteuses, on peut citer les nouveaux oxydes fonctionnels (permettant par exemple de nouveaux concepts de dispositif de mémorisation de l'information), les nanofils (carbone, Si ou autres semi-conducteurs) et le graphène, ainsi que l'électronique moléculaire compatible CMOS (intégration hybride).

Même si la priorité se situe légitimement encore au niveau du fondamental (physique, chimie) pour la compréhension des mécanismes de base, il faudra veiller à ce que les nouveaux concepts développés ne restent pas uniquement des «exploits» de laboratoire, mais prennent en compte la faisabilité d'intégration industrielle. Le GDR «Nanoélectronique» qui regroupe la majorité des laboratoires français du domaine semble bien placé pour structurer cette communauté et insuffler les collaborations nécessaires.

L'électronique organique

L'électronique organique, aussi connue sous le nom d'« électronique plastique » utilise des matériaux

semi-conducteurs dont la formulation est basée sur la chimie du carbone. Ce sont bien les propriétés qui résultent des interactions entre un ensemble de molécules qui sont utilisées dans les applications de l'électronique organique. Si l'on s'intéresse aux applications, les dispositifs de l'électronique organique se classent en quatre catégories : les diodes électroluminescentes (OLED), les cellules photovoltaïques (OPV), les transistors à effet de champ (OFET) et les capteurs.

Il n'y a pas en France un laboratoire reconnu et identifié en tant que tel sur cette thématique, mais une multiplication de petits groupes de recherche qui ne comprennent que quelques chercheurs permanents dans des disciplines variées (chimistes, physiciens, électroniciens,...). Si cette situation peut présenter quelques avantages, elle entraîne également des handicaps, en particulier une quasi-absence des équipes françaises dans les projets européens, dans les éditions spéciales des journaux scientifiques qui traitent de l'électronique organique et dans les conférences spécialisées comme la Gordon Conference 2008 « Electronic processes in organic materials » (1 représentant français). Malgré tout, la communauté française est beaucoup mieux représentée dans les conférences plus ouvertes comme ECME. Compte tenu de l'importance actuelle de ce domaine et plus encore de celle qu'il est amené à prendre dans le futur, il apparaît inconcevable que la France soit absente d'un secteur d'activités potentiel de 30 milliards de dollars en 2015. Selon IDTechEx dans son rapport Organic & Printed Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2007-2027, « ... peu d'autres technologies auront sur le secteur un impact aussi important dans les vingt prochaines années. Sous forme d'applications pour les emballages intelligents, les panneaux électroniques, les affiches, les signaux et les livres électroniques, l'électronique organique va influencer les secteurs de l'imprimerie et de l'édition conventionnelle. L'éclairage organique va impacter les ventes du secteur de l'éclairage, l'incandescent comme le fluorescent ». Notons également qu'une des spécificités de l'électronique organique est de tendre vers des moyens de production bas coûts applicables ou non aux grandes surfaces. Du fait de la « simplicité » de mise en œuvre des semiconducteurs organiques, il sera tout à fait envisageable de voir se disséminer des petites unités de productions comme nous en avons vu apparaître pour le tirage des photos numériques.

Dans ce contexte, la création d'un GDR « Electronique organique » est une excellente initiative qui va permettre de fédérer et d'organiser les recherches du domaine. Les problématiques devant être abordées concernent la couche active, les substrats et couches conductrices, la physique des semiconducteurs organiques, la durée de vie des matériaux et des dispositifs (passivation et encapsulation, fiabilité), le couplage optique - interaction onde matière, et les composants et circuits. Une proposition consisterait à fédérer les moyens technologiques et à les rattacher aux centrales RTB.

4.2. Circuits et systèmes

L'apparition ces dernières années des systèmes in Package ou des systèmes on Chip (SiP – SoC) a rendu de plus en plus complexe la conception des circuits intégrés ainsi que leur test ou leur calibration. Dans le même temps,

ces composants ont envahi presque tous les domaines de la vie courante (communications, transport : automobile-aéronautique-spatial, santé, jeux...). Pour la plupart de ces domaines, on attend de ces systèmes qu'ils garantissent une sûreté de fonctionnement optimale. Pour répondre à cette demande sociétale, les circuits intégrés électroniques se doivent d'être facilement testables, de plus en plus fiables et reconfigurables si possible dynamiquement.

Face à ces défis, sont apparues des techniques de conception orientées Test (COT) ou Fiabilité (COF) qui intègrent des circuits uniquement destinés à améliorer la testabilité ou la fiabilité. En parallèle, la part grandissante du numérique dans les CI a permis le développement des logiciels enfouis, facilitant la reconfigurabilité des systèmes.

L'autre caractéristique des systèmes électroniques est leur capacité à communiquer. Ces nouveaux systèmes communicants sont dès maintenant présents dans plupart des objets courants. Il suffit d'allumer son ordinateur dans un hall de gare ou d'aéroport pour constater que les PC se reconnaissent les uns les autres et que dès lors peuvent se créer spontanément des réseaux. C'est le même principe qui est mis en œuvre dans le cadre des réseaux de capteurs pour la surveillance des installations industrielles, ou la surveillance des incendies, etc... Pour les systèmes impliqués dans de tels réseaux une problématique supplémentaire survient : l'autonomie énergétique.

Dans ce domaine le GDR a permis la fédération des différents acteurs.

Les problématiques actuelles concernent l'autonomie énergétique et la consommation, l'interopérabilité des systèmes, la sûreté de fonctionnement et la fiabilité, la sécurité des échanges (cryptographie), les aspects sociaux (par exemple acceptabilité de la RFID – Radio Frequency Identification -, appropriation de la complexité), les logiciels embarqués et les architectures matérielles, les architectures reconfigurables, le test et la tolérance, les méthodes et outils de conception AMS & RF, les systèmes hétérogènes, ainsi que les technologies émergentes.

4.3. Nanomagnétisme

Spintronique

Traditionnellement le spin des électrons n'était pas utilisé dans les dispositifs électroniques. Depuis une vingtaine d'années, cette électronique de spin s'est fortement développée, à la fois en terme de compréhension fondamentale des phénomènes de transport dépendant du spin (périmètre de la section 06), mais aussi du côté de leur mise en œuvre dans des dispositifs tels que les capteurs magnétiques magnétorésistifs qui ont atteint le stade industriel.

Magnétorésistance

Plus récemment, les performances des capteurs magnétorésistifs ont continué à progresser (magnétorésistance tunnel à barrière MgO) et ces améliorations fondamentales (filtrage en spin) ont rapidement été transférées aux dispositifs. Ces capteurs sont utilisés de façon individuelle, plus ou moins miniaturisés, et sont aussi l'élément de base d'une famille

de mémoires magnétiques non volatiles (MRAM : Magnetic Random Access Memory). Ces mémoires ont aussi atteint le stade commercial pour des applications niches car leur densité reste très inférieure à celle des mémoires semiconductrices mais leur non-volatilité, la rapidité d'écriture et la cyclabilité sont des facteurs compétitifs. Les laboratoires français sont particulièrement actifs pour développer de nouveaux concepts et de nouvelles générations d'éléments de mémoires MRAM.

L'élément magnétorésistif au cœur de la MRAM est aussi mis en œuvre pour le développement de mémoires programmables dans le champ émergent de la logique magnétique. Ceci permet d'intégrer le stockage de données et la programmation de fonctions.

Transfert de spin

Depuis moins d'une dizaine d'années le couple de transfert de spin, phénomène dual de la magnétorésistance géante, est aussi le sujet d'une quantité exponentiellement croissante de travaux.

L'interaction d'un courant polarisé en spin avec l'aimantation d'un nanoélément peut conduire à un renversement d'aimantation sans application de champ magnétique. Ceci entraîne une simplification des dispositifs par disparition des lignes sources de champ magnétique. Des vitesses d'écriture de l'ordre de 100 ps peuvent aussi être atteintes par renversement précessionnel de l'aimantation.

A plus basse densité de courant, le couple de transfert de spin induit une oscillation de l'aimantation. Ce phénomène couplé à la magnétorésistance est à l'origine d'une nouvelle famille d'oscillateurs hyperfréquence accordables. Pour l'instant les puissances émises restent modestes mais le sujet est récent et en plein développement, en particulier au niveau français.

Contrôle électrique

L'objectif de contrôler le spin des électrons ou l'aimantation par un champ électrique donne lieu à des recherches fondamentales très actives. Dans le futur, des dispositifs devraient émerger que ce soit en électronique et opto-électronique (transistor magnétique, LED polarisée) ou en dispositifs et micro-systèmes accordables associant magnétisme et ferroélectricité ou piézoélectricité.

Nano et Micromagnétisme

L'étude du nanomagnétisme est particulièrement active du côté fondamental (section 06) ainsi que du côté des nouveaux matériaux fonctionnels. En l'absence d'acteur industriel majeur dans le domaine de l'enregistrement magnétique (disque dur), les efforts doivent se concentrer sur les ruptures technologiques que peuvent apporter l'utilisation de nouveaux effets dans des dispositifs ainsi que l'intégration des matériaux magnétiques fonctionnels évoquée par ailleurs dans ce rapport (inductances intégrées, microsystèmes magnétiques).

5. Ondes, composants et systèmes hautes fréquences

Le domaine des hautes fréquences et de

leurs applications est parfaitement identifié selon des thématiques allant des matériaux-composants aux systèmes. Pour l'ensemble de ces thématiques, la France se situe dans les dix premières nations en termes de production scientifique (source Web of Sciences). Les challenges concernent l'accroissement des performances (fréquence, puissance, faible consommation) et l'intégration des dispositifs et systèmes. Le cœur des activités reste très lié aux applications et verrous industriels. Néanmoins la progression des technologies conventionnelles (silicium, III-V) incluant des dispositifs actifs et passifs est proche d'atteindre son apogée. A titre d'exemple, les fréquences de coupure des filières silicium (CMOS, BiCMOS) atteignent 0.5 THz, elles sont proches du THz pour certaines filières III-V. C'est une raison pour laquelle une partie de l'activité est en train de se diversifier en orientant la recherche vers les nouveaux défis que sont les nanotechnologies, l'énergie, les futurs systèmes de télécommunication, le développement durable, etc. Dans ce cadre, le soutien significatif d'activités à la croisée de disciplines telle que la biologie, la chimie, la physique et la biophysique, est primordial. Ces recherches touchent le domaine des matériaux offrant de nouvelles propriétés remarquables en haute fréquence, des nouvelles voies technologiques pour répondre à de nouveaux défis (conformabilité, compatibilité environnementale pour de nouvelles applications sociétales, ...), mais aussi les approches théoriques (modélisation) et conceptuelles des nouveaux systèmes et réseaux de communications (intelligence ambiante, communications numériques, objets communicants, ...) et de leurs briques de bases (composants, antennes, etc.).

5.1. Dispositifs et nano composants électroniques

Pour les filières conventionnelles de composants et circuits, les technologies CMOS et BiCMOS SiGe dominent le marché des circuits numériques analogiques millimétriques et mixtes analogique-numérique. Les filières III-V, notamment InP (maintenant disponible sur substrat GaAs au niveau industriel), permettent d'adresser des niches applicatives. Les filières à base de composés antimoniés sont aussi une alternative crédible pour la réalisation de composants hautes fréquences à ultra faible consommation. Ces futures technologies peuvent adresser des applications en gamme millimétrique (imagerie, détection de molécules...), mais également en gamme centimétrique pour les systèmes de communication autonomes en énergie. Toujours dans le domaine des filières technologique III-V, les activités autour du GaN suscitent encore un grand intérêt pour de nombreuses applications civiles, militaires, et récemment pour le spatial (projet ESA). Les efforts visent à réaliser des circuits intégrés de puissance MMIC jusqu'à 100 GHz. Les avancées sur les matériaux, en particulier la croissance d'hétérojonctions à base de GaN sur silicium (ou matériaux composite faible coût à base de silicium), permettent d'adresser des applications civiles à grande échelle (électronique de puissance).

Dans le domaine des sources, une des priorités consiste toujours à combler le manque de dispositifs performants dans une bande de fréquence située entre le domaine de

l'optique et du sub-millimétrique : le gap terahertz (THz). Pour les applications visées telles que la spectroscopie THz ou l'imagerie, le verrou est toujours lié à la faible puissance des sources à état solide. Des progrès ont été obtenus pour les QCL (Quantum Cascade Laser), en particulier à base de matériaux antimoniés, en améliorant le compromis entre longueur d'onde et température de fonctionnement. Les challenges relatifs aux systèmes rayonnants dans ce domaine sont abordés au chapitre suivant.

Les études entamées depuis quelques années sur des nanomatériaux tels que les nano-fils semi-conducteurs, les nanotubes de carbone métalliques et semi-conducteurs, ou le graphène, restent d'actualité pour leurs propriétés électroniques, électromagnétiques, mécaniques, chimiques. Le niveau de publications (2009) dans ce domaine reste élevé tant sur les aspects fondamentaux qu'applicatifs. En particulier au cours de l'année 2009, des progrès remarquables ont été démontrés pour les dispositifs hautes fréquences à base de graphène, poussés par de grands programmes DARPA (USA).

L'approche conception logicielle « software design » se généralise par ailleurs tant pour les systèmes de communication que les systèmes radar. Cette approche logicielle basée sur le traitement et la génération de signaux complexes par voie numérique n'est actuellement freinée que par les limitations fréquentielles des convertisseurs analogique/numérique. On peut raisonnablement envisager que dans quelques années, les circuits analogiques seront réduits aux seules fonctions d'amplification de puissance ou à faible bruit et de conversion de fréquence et de filtrage.

5.2. Composants, circuits et dispositifs passifs et actifs

Dans ce domaine, sur le plan technologique, les principaux challenges concernent la recherche de nouvelles solutions, notamment basées sur l'utilisation de nouveaux matériaux commandables ou déformables (commande électrique, magnétique, pneumatique, optique, etc.) et sur l'utilisation de méta-matériaux, de l'ingénierie de bande et de configurations multicouches (éventuellement hybrides) à fort degré d'intégration.

De nombreux travaux portent sur les matériaux à faible ou à forte permittivité pour la réalisation d'éléments localisés de type capacité ou inductance pouvant être intégrés dans une technologie Silicium. Dans cette voie, les matériaux composites basés sur l'utilisation de ferroélectriques et/ou de ferromagnétiques trouvent de nombreuses applications et offrent la perspective de meilleures performances pour les composants et de nouvelles potentialités comme l'agilité en fréquence des composants ou des surfaces.

La technologie MEMS est également une voie très explorée, notamment dans la réalisation de capacités variables, de commutateurs à actionnement électrostatique ou d'antennes reconfigurables. Actuellement les objectifs visent à abaisser les tensions de commande (pour faciliter leur intégration avec la technologie CMOS) et à diminuer les temps de commutation (afin de rendre compatibles ces éléments dans des circuits de commande de reconfigurabilité en temps réel). Ces composants souffrent cependant de problèmes de fiabilité qui doivent être résolus

afin de lever ce point bloquant pour leur intégration dans les systèmes.

Deux types de circuits, conçus à partir des dispositifs passifs élémentaires, constituent l'essentiel des chaînes de télécommunications : les dispositifs de filtrage de signaux et les éléments rayonnants (antennes). La miniaturisation de ces dispositifs est un enjeu important aux fréquences inférieures à quelques GHz, notamment en vue de leur utilisation dans les systèmes embarqués et de leur intégration au plus près des circuits afin de faciliter leur connexion aux autres éléments. Une tendance vise à l'intégration hétérogène complète de ces composants passifs avec les circuits actifs dans une approche de type SIP (System In Package). Dans le domaine des hautes fréquences (ondes millimétriques et sub-millimétriques), l'un des enjeux consiste aussi en la conception de dispositifs rayonnants 2D ou 3D, à fort rendement, reconfigurables, et ou multi-fonctions. En particulier, les antennes large bande grand gain (réseaux réflecteurs, réseaux transmetteurs, systèmes focalisants et lentilles, antennes à ondes de fuite) constituent l'un des verrous à lever pour les systèmes de communications large bande, les systèmes radars (automobile, etc.) et les systèmes de détection, de surveillance et d'imagerie. En termes de performances électriques, le défi est là aussi l'obtention d'une flexibilité ou reconfigurabilité pour répondre aux besoins des nouveaux systèmes de communication participant à une intelligence ambiante.

Ceci est particulièrement vrai pour les antennes qui devront présenter une reconfigurabilité multi-standards de leurs caractéristiques (diversité de diagramme, de fréquence ou de polarisation) et être associées à des circuits de commande de très petite taille, intégrés au plus proche de ces antennes sans que leurs performances soient dégradées (compacité, CEM –Compatibilité électromagnétique-, etc.). Ces composants devront également intégrer des fonctions intelligentes qui permettront par exemple de router l'information avec une gestion optimale de l'énergie.

Dans le domaine des résonateurs, plusieurs technologies semblent importantes (technologie BAW – Bulk Acoustic Wave-, résonateurs à nano-gaps). Il s'agit en particulier de rechercher de nouveaux concepts permettant la montée en fréquence de ces composants, leur adaptation dans des dispositifs plus complexes et enfin leur intégration dans une technologie CMOS. Enfin, même si leur domaine de prédilection est avant tout l'optique, les métamatériaux et les matériaux artificiels sont une solution originale pour la réalisation de composants performants en micro-ondes et en millimétrique (filtres, antennes multifréquences, dispositifs et antennes compactes, ...). La mise au point de ces matériaux, pour un fonctionnement à des fréquences relativement basses et l'optimisation des topologies de circuit, est encore en développement.

Sur le plan de la modélisation électromagnétique, de nombreux problèmes restent à résoudre, tels que la modélisation de circuits et antennes en environnement complexe (corps humain, structures de grande taille, etc.) ainsi que le développement d'outils d'analyse électromagnétique rapide, d'optimisation et de synthèse. Cela concerne de nombreuses classes de méthodes numériques (méthodes hautes fréquences, méthodes globales temporelles ou fréquentielles, etc.) et constitue l'un des enjeux majeurs à relever dans ce domaine.

5.3 Conclusion

La visibilité de la recherche française dans ce domaine tient à plusieurs facteurs tels que :

- des orientations en accord avec les priorités de l'industrie, de la défense, des télécommunications et du spatial,
- des moyens technologiques et métrologiques des laboratoires au meilleur niveau.

Depuis plusieurs années, on observe une diversification des travaux de recherche vers des secteurs tels que les nanotechnologies, l'énergie, les futurs systèmes de télécommunications, le développement durable, les nouvelles méthodes numériques. Des travaux sont également menés aux interfaces entre disciplines : matériaux – chimie – ingénierie ; nanotechnologie – physique ; ondes – biologie et santé ; ondes – biophysique ; électronique – ingénierie de l'information – SHS, etc.

En tenant compte de ce préambule, l'activité fait face à un dilemme entre des actions valorisantes à court terme (en termes de budget, production scientifique, recrutement de personnels sur contrats) et une diversification salvatrice des activités avec des objectifs à long terme tout en incluant le mariage des disciplines (STIC/santé, STIC/Chimie, Maths/STIC, STIC/Physique). Il doit également être tenu compte du fait que ce domaine de recherche est mené par un personnel constitué majoritairement d'enseignants-chercheurs. Enfin, bien que l'analyse du secteur montre une activité en « bonne santé » et à l'équilibre, on peut s'interroger, sans pessimisme exacerbé, sur son devenir si deux facteurs importants venaient à changer :

- Modification du paysage industriel pour les applications de la défense, sécurité, télécommunications, spatiales, etc.,
- Décroissance du nombre de personnels non permanents (défection dans les formations spécialisées, difficultés d'attractivité des étrangers dans les laboratoires, etc.).

Si toutes les grandes thématiques du domaine auraient besoin d'actions de renforcement, deux d'entre elles le mériteraient en particulier : les activités à forte teneur technologique / métrologique et les activités dans le domaine des architectures des dispositifs et systèmes et de l'interface 'hard/soft' pour les futurs systèmes de télécommunication. Pour le premier domaine, les activités technologiques drainent de nombreuses autres thématiques plus généralistes telles que la modélisation électromagnétique et l'optimisation, l'électronique haute fréquence, les futures applications. Pour le second (circuits, antennes, systèmes, architecture), l'état des lieux montre en outre qu'un renforcement est nécessaire, en particulier un accroissement du personnel CNRS (CR, ITA notamment). Par ailleurs, cette thématique s'inscrit dans les futurs défis sociétaux dans les domaines de la sécurité, de la mobilité, de l'environnement, de l'aide à la personne, de l'impact sanitaire et environnemental de nouveaux types de signaux (applications sans fil émergentes, applications médicales).

La représentativité des chercheurs temps plein (CNRS) est relativement faible pour la majorité des thématiques. Ce rapport est encore plus faible pour les activités relatives à la conception de circuits/antennes/systèmes hautes fréquences (micro-ondes, millimétrique). Le nombre de personnels permanents en regard du nombre

de non permanents se situe entre 0.6 et 1. Même si cette constatation peut être admise par le fait d'une forte activité contractuelle, le nombre de doctorants, post-doctorants et ingénieurs contractuels doit être surveillé à court terme.

Des rapports de veille technologique établissent une feuille de route riche en recherches de base et applicatives pour les vingt prochaines années : il s'agit du domaine de l'électronique imprimée (multicouche, hybride, organique, etc.) pour la photonique ou le photovoltaïque. Pour la partie électronique (circuits, composants, antennes), et en particulier les micro-ondes et l'électromagnétisme, les défis à relever concernent les performances fréquentielles (et notamment la montée en fréquence (millimétrique, THz), le développement de méthodes numériques rapides adaptées à la synthèse électromagnétique, l'autonomie en énergie, les communications numériques. Les avantages souhaités et porteurs d'applications sont la flexibilité/conformabilité, la compatibilité avec l'environnement (ecoTIC), la transparence, la reconfigurabilité, l'intégration, la miniaturisation, l'augmentation des fréquences de fonctionnement et des débits, etc. Par ailleurs, il est fondamental de favoriser la construction de projets de recherche pluridisciplinaires à la croisée de disciplines telles que l'électronique au sens large et les sciences de la matière, du vivant et de la santé.

6. Génie électrique

Dans les recherches menées en génie électrique, les grandes tendances actuelles sont guidées par des demandes sociétales fortes, dont la principale relève depuis quelques années de préoccupations liées à l'écologie. Le Grenelle de l'Environnement, la sensibilisation du public aux émissions de carbone, l'introduction récente de véhicules hybrides et de véhicules électriques dans un avenir proche, sont des exemples de facteurs qui contribuent à une amélioration de l'efficacité énergétique globale obtenue grâce aux progrès accomplis dans tous les maillons de la chaîne énergétique, des composants aux systèmes en passant par la production, le transport, le stockage et la conversion de cette énergie avec un niveau de sûreté le plus élevé possible. Les autres enjeux technologiques, économiques et sociétaux auxquels le génie électrique se doit de répondre sont la mobilité et la disponibilité énergétique, l'apport de solutions pour l'investigation, les traitements médicaux et l'assistance de fonctions vitales.

Aujourd'hui, le génie électrique se décline du système à l'échelle d'un continent (réseaux d'énergie interconnecté) aux objets micro- voire nanométriques, du gigawatt au milliwatt. La démarche développée est en général de plus en plus de type « système », et les recherches bâties sur un socle fort de sciences physiques impliquent de nombreuses disciplines comme l'automatique, la mécanique, l'électronique, l'informatique, les matériaux, les mathématiques appliquées, les sciences de la vie, la thermique, ...

6.1. Vers une meilleure efficacité énergétique

En Europe, l'électricité est la troisième source d'énergie disponible pour la consommation finale avec 21

% de l'énergie totale (1171 MteP – Mégatonnes équivalent pétrole -).

Dans l'industrie en France, la motorisation représente le poste principal de consommation de l'électricité. Dans les applications de transport pour lesquelles l'électricité n'est pas l'énergie disponible pour la consommation finale, un nombre croissant d'équipements électriques sont installés pour réaliser des fonctions nouvelles, de confort en particulier, ou en remplacement d'autres solutions technologiques (actionnement ou propulsion par exemple), en apportant un gain de la masse embarquée et donc une réduction significative de la consommation d'énergie primaire. Pour améliorer l'efficacité énergétique, trois axes doivent être suivis :

Amélioration de l'efficacité énergétique des composants

L'amélioration des propriétés fonctionnelles des matériaux permet de réduire les pertes et d'améliorer la densité de puissance des composants, facilitant ainsi leur utilisation et le fonctionnement dans des environnements sévères. Par exemple, la diminution des pertes fer des transformateurs électriques correspond à un enjeu particulièrement important. La conception de dispositifs de conversion à haut rendement (électronique de puissance et actionneur), compacts, capables de tenir des niveaux de tension et de courant divers et des environnements sévères, et l'intégration du convertisseur électronique au plus proche de l'actionneur facilitent l'utilisation des actionneurs dans leurs conditions optimales.

Amélioration de l'efficacité énergétique dans la chaîne énergétique

Les réseaux de distribution et l'intégration des sources locales sont des points qui restent aujourd'hui cruciaux. En effet, une solution pour réduire les pertes dans la distribution de l'énergie électrique consiste à produire l'énergie électrique au plus proche de la consommation. Aussi l'interaction entre les différentes sources locales (cogénération), le stockage et le pilotage du réseau doit-elle être étudiée. En particulier, le contrôle coordonné génération-stockage-charge est un point clef de l'efficacité énergétique globale de la chaîne énergétique « électrique ».

Optimisation globale du système énergétique

Si des recherches pour l'optimisation de chaque constituant vis-à-vis de l'efficacité énergétique sont indispensables, l'optimisation globale des architectures, qu'elles soient électriques ou multi énergies, permet d'identifier le ou les composants clefs à optimiser. En particulier, le contrôle et la gestion optimale de l'énergie, l'analyse des cycles de vie, la sûreté de fonctionnement et la maîtrise des nuisances doivent être pris en compte dans cette optimisation globale. Pour atteindre cet objectif, la modélisation multiphysique et prédictive, notamment des pertes (diélectrique, magnétique ...), est un point complexe mais essentiel.

6.2. Matériaux innovants

Les ruptures technologiques passent très souvent par la maîtrise des propriétés des matériaux existants, l'élaboration de nouveaux matériaux aux fonctionnalités nouvelles. La thématique des matériaux prend donc une place importante dans les laboratoires de génie électrique. Les gains attendus sont multiples, comme par exemple le gain de masse et de compacité des systèmes, la compatibilité des composants dans le biomédical, l'amélioration de l'efficacité dans un contexte d'isolation thermique, électrique, magnétique, acoustique, etc. Les verrous se situent à plusieurs niveaux, de l'élaboration du matériau jusqu'à son introduction dans le système en intégrant les contraintes spécifiques à chaque application, et pour lesquelles connaissance et caractérisation demeurent conjointement au cœur des préoccupations.

Performances fonctionnelles

Les principales améliorations des fonctions attendues des matériaux dans le génie électrique concernent leurs aptitudes à stocker de l'énergie électrostatique (diélectrique à conductivité électrique maîtrisée et variable, haute permittivité) ou électromagnétique (haute perméabilité, saturation magnétique élevée), à évacuer la chaleur (matériaux à conductivité thermique maîtrisée), à réduire les pertes par conduction (supraconducteur à haute température critique).

Tenue aux conditions extrêmes

Le contexte d'utilisation de ces matériaux devient de plus en plus contraignant, que ces contraintes soient intrinsèques ou extrinsèques. Aussi, les efforts doivent porter sur la tenue de ces matériaux soumis à de hautes ou de basses températures, ou à de fortes sollicitations mécaniques et électriques. Ces contraintes soulèvent de nouvelles questions de prédiction du vieillissement, de la durée de vie et de la fiabilité dans un contexte de maintenance prédictive ; pour y répondre, une modélisation de la complexité et des interactions des phénomènes devient nécessaire.

Élaboration et mise en œuvre dans l'application

Dans l'élaboration de nouveaux matériaux, des champs d'investigation apparaissent dès que l'on considère l'apport de nanorenforts (élaboration de nanocomposites par exemple) dont il convient de maîtriser les propriétés individuelles et collectives. Les préoccupations écologiques conduisent par ailleurs à des réflexions et recherches autour des écomatériaux, dont le mode de fabrication économise l'environnement et l'énergie, et qui présentent une recyclabilité mieux maîtrisée. Enfin, il faut sans cesse veiller à la compatibilité technologique de leur mise en œuvre.

6.3. Conception et optimisation des dispositifs de conversion de l'énergie

La conception des systèmes de conversion dans

leur ensemble tend actuellement vers une plus grande intégration fonctionnelle. L'objectif est alors de concevoir des systèmes qui répondent globalement à une fonction, intégrant des convertisseurs électroniques de puissance, des convertisseurs électromécaniques, une électronique de réglage, un système de supervision... Cela oblige à proposer des architectures innovantes pour répondre à ces besoins et à développer des approches de conception plus globales. Les verrous essentiels se situent dans la conception et l'exploitation des matériaux, des composants passifs et actifs sous des contraintes de tension, de densité de courant, de température de plus en plus élevées.

Convertisseurs électroniques de puissance

Dans ce domaine, il s'agit d'améliorer les performances des systèmes de conversion d'énergie à travers l'augmentation des tensions, fréquences et températures de fonctionnement des composants, mais également à travers une intégration permettant de réduire les tailles, les coûts et les pertes. En terme d'intégration, deux stratégies complémentaires doivent être développées: l'intégration monolithique autour de la fonction interrupteur, et l'intégration hybride 3D à l'échelle du convertisseur :

- Pour le premier niveau l'évolution technologique autour du support silicium permettra le développement d'architectures semi-conductrices susceptibles d'améliorer les performances intrinsèques des composants de puissance intelligents et la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie en intégrant des fonctions de commande et de protection, mais également d'isolation galvanique ou des fonctions passives ou actives de gestion de la thermique. En parallèle, afin de répondre aux nouvelles exigences d'applications en termes de fréquences, température, pertes, il est nécessaire aujourd'hui de développer de nouvelles filières technologiques sur des semi-conducteurs à large bande interdite (grand gap) tels que le carbure de silicium (SiC), le Nitrure de Gallium (GaN), et le diamant.

- Le deuxième niveau d'intégration à l'échelle du convertisseur impose une intégration hybride 3D avec des problématiques relatives aux couplages de phénomènes, à la technologie (en particulier pour l'intégration des passifs), la CEM, la gestion de la thermique,... Ce niveau d'intégration nécessite de gros efforts de recherche coordonnés, depuis les niveaux matériaux et composants (actifs et passifs) jusqu'aux architectures de convertisseurs en prenant en compte les problématiques de modélisation et de développement technologiques.

Enfin, l'augmentation des contraintes conduit à un fonctionnement à température ambiante à plus de 300°C, des tensions de l'ordre de 30 kV par composant, 100 kV pour le convertisseur qui sont à présents des objectifs visés pour des applications dans le domaine du contrôle et de la protection des réseaux de transport et de distribution de l'électricité, de la traction ferroviaire,...

Convertisseurs électromécaniques

Des progrès doivent être accomplis dans le domaine des convertisseurs électromécaniques haute vitesse: Les études menées concernent la recherche de structure d'actionneurs en liaison avec les matériaux capables de supporter les contraintes mécaniques et thermiques et leur alimentation électrique à haute

fréquence de découpage.

A ces hautes vitesses peuvent s'ajouter des nécessités de haute température et forte compacité pour des convertisseurs destinés par exemple aux systèmes embarqués (aéronefs, automobile), et pour lesquels s'ajoutent les problématiques de vieillissement et de fiabilité.

Enfin, pour le cas des convertisseurs électromécaniques basse vitesse/fort couple, pour les systèmes éoliens ou pour les moteurs de traction sans réducteur, il est nécessaire d'augmenter les couples massiques pour atteindre, en régime impulsif, la centaine de Nm/kg.

Systemes

Dans des contextes particuliers tels que la montée en vitesse et en fréquence, l'optimisation des « éléments » convertisseurs électroniques et électromécaniques est évidemment nécessaire, comme déjà souligné. Mais des avancées potentielles relèvent aussi de l'association judicieuse de ces éléments et de leurs interfaces (filtrages, câblages...) vis-à-vis des compromis à rechercher en terme de masse/compacité, d'efficacité énergétique, de qualité (CEM...). Les problèmes posés sont clairement multiphysiques (magnétique, électrique, thermique, mécanique, mécanique des fluides), multiéchelle de temps (modélisation de phénomènes transitoires très courts qui ont une influence sur le vieillissement à long terme des composants électroniques), multiéchelle dans l'espace. De plus, l'analyse amont de la fiabilité exige une approche de modélisation statistique. Enfin, outre les aspects physiques, la conception fait appel à de multiples autres domaines tels que les modélisations économiques ou d'impact écologique en prenant en compte les cycles de vie des convertisseurs, en incluant les coûts énergétiques et empreintes environnementales de la réalisation, de l'usage et du recyclage...

6.4. Transmission d'énergie et C.E.M

L'interaction entre énergie électrique et énergie électromagnétique peut soit être mise à profit pour la transmission d'énergie par ondes électromagnétiques, soit être subie (Compatibilité électromagnétique).

Transmission d'énergie par ondes électromagnétiques HF

Pour la transmission d'énergie sans contact pour des systèmes nomades, mettant en jeu des niveaux d'énergie très faibles et des distances courtes, deux techniques sont envisageables: transfert proche par induction électromagnétique moyenne fréquence, transfert par faisceau micro-ondes sur des distances plus grandes. Pour l'alimentation de systèmes nomades dans le contexte du développement de l'intelligence ambiante, la transmission par faisceau micro-ondes apparaît plus adaptée du fait de la portée accrue par rapport aux techniques par induction magnétique et de la possibilité d'utiliser des antennes directionnelles. Le verrou principal à lever tient au fait que le rendement global du système doit être maximal, la puissance disponible transportée par une onde rayonnée devant être limitée en intensité pour des raisons normatives de sécurité.

C.E.M.

La pollution électromagnétique engendrée par les dispositifs d'électronique de puissance s'accroît notamment du fait de l'accroissement de leur nombre, de l'augmentation des vitesses de commutation des interrupteurs de puissance facilitant largement les couplages parasites. Dans ce domaine, les enjeux majeurs concernent la prédiction des émissions conduites et rayonnées, la conception virtuelle avec prise en compte de contraintes CEM et l'optimisation de la solution, les moyens d'essais et mesure et les bancs de caractérisation spécifiques pour la CEM de l'énergie dans les domaines envisagés. En parallèle, des actions de recherche visant à réduire la CEM en électronique de puissance via une action sur les structures de conversion statique doivent être menées : nouvelles structures de conversion statique (utilisation de nouveaux composants, de commandes rapprochées gérant la CEM, de lois de commande minimisant les spectres des grandeurs polluantes), intégration monolithique ou hybride des convertisseurs statiques (pour un confinement structurel des perturbations), mise en œuvre aux meilleurs coûts de solutions actives de filtrage, de compensation et de blindage, et enfin spécification, développement et usage de matériaux mieux adaptés à la gestion de la CEM des systèmes, sous-systèmes et charges finales (actionneurs par exemple).

6.5. Sûreté de fonctionnement des dispositifs de conversion de l'énergie électrique

Pour les dispositifs électriques, les axes de recherche dans les prochaines années devraient concerner l'augmentation de leur disponibilité, avec deux grandes directions, la prévention de défaillance qui permet l'optimisation des opérations de maintenance préventive d'une part, et la localisation et l'identification rapide des défaillances et leur évaluation d'autre part.

Il s'agit pour les composants d'électronique de puissance de bien comprendre les mécanismes de vieillissement et de dégradation principalement par l'expérimentation et de développer des modèles permettant d'évaluer leur durée de vie. Pour les constituants des systèmes, il s'agit de rechercher des structures de convertisseurs qui permettent de pallier la défaillance d'un des constituants, actif ou passif, et de développer des modèles permettant d'obtenir une signature de défaillances, soit par mesures directes de grandeurs électriques, soit par des mesures indirectes : mesures de champs rayonnés, vibrations mécaniques ou acoustiques. Pour les entraînements à vitesse variable, il convient de profiter des algorithmes sophistiqués de commande des machines électriques pour d'une part détecter une défaillance au niveau d'un élément, et d'autre part mettre en place des commandes redondantes permettant dans certains cas de s'en affranchir.

6.6. Production d'électricité – systèmes énergétiques autonomes ou semi-autonomes

La production d'électricité pour des systèmes autonomes ou semi-autonomes est en plein développement, qu'il s'agisse de réseaux embarqués ou de production décentralisée (dans les bâtiments par exemple).

Les architectures de puissance, obtenues par association de sources d'énergie (générateurs tournants, piles à combustible...), de dispositifs de stockage et de charges (actionneurs, auxiliaires...) interconnectés par des supports de transmission de l'énergie électrique (réseaux continus, alternatifs) à travers des interfaces électroniques de puissance restent à définir et à optimiser. Les axes de recherche concernent également la gestion dynamique des flux d'énergie dans le système ou dans un sous-ensemble du système en tenant compte des contraintes, limitations, critères privilégiés et scénarios de fonctionnement retenus. Cela inclut la répartition optimale de l'effort énergétique et des sollicitations entre les différentes composantes, le pilotage optimal des charges lors des différentes phases avec anticipation de la demande ou restitution, ainsi que la gestion optimale des actifs et de la continuité de service à assurer lors de pannes internes ou externes au système. La nécessité de continuité de service impose le contrôle robuste et performant des convertisseurs interfaçant les différents constituants de la chaîne de puissance de façon à ce qu'ils suivent les consignes fixées par le système de gestion d'énergie en tenant compte des dérives et dispersions paramétriques, des perturbations amont et aval, des charges/sources connectées, etc. La fiabilité de ces dispositifs conduit quant à elle à des recherches sur la détection et la localisation des défaillances affectant les composants de la chaîne de puissance, les capteurs ou les dispositifs de contrôle, sur les processus de reconfiguration exploitant les redondances et la hiérarchie des usages, et enfin sur la mise en œuvre d'outils d'aide à la maintenance...

6.7. Réseaux électriques de transport et de distribution

Les activités de recherche dans ce domaine sont liées d'une part aux évolutions récentes du marché de l'électricité (dérégulation) et de son extension, d'autre part aux multiples sources d'énergie renouvelables dont la part de production ne fera que croître, qu'il s'agisse d'éolien ou de solaire.

Infrastructures critiques

Les enjeux principaux sont la maîtrise des congestions et des « blackouts ». Le verrou principal réside dans la dimension mathématique du système étudié (nombre de nœuds, mailles et variables d'état, non linéarités, interactions entre sous-ensembles), ainsi que dans le caractère aléatoire des événements et la diversité des risques.

Dans le domaine de la modélisation et simulation des grands systèmes complexes et hétérogènes, les axes de recherche sont nombreux et portent sur la compréhension

des interactions composants/systèmes et systèmes de puissance/système de commande, des dynamiques en jeu en vue d'une décomposition optimale en sous-ensembles et d'une réduction de modèles.

Les risques et vulnérabilités restent à évaluer par l'élaboration d'indicateurs macroscopiques temps réel du niveau de sûreté du réseau. Les réseaux étant fortement maillés, des modèles des interdépendances entre réseaux et entre réseau de puissance et système de transmission et de traitement de l'information doivent être développés ainsi que des modèles d'analyse des phénomènes de cascade.

Il convient également de tout mettre en œuvre pour faire face à d'éventuels problèmes de congestions par la mise en place d'outils de prévision et d'analyse qui devraient déboucher sur des méthodes de gestion des congestions par reconfiguration des réseaux, re-répartition de la production ou délestage de charge.

Intégration du renouvelable au réseau de distribution et stockage

Des injections de puissance de caractéristiques bien diverses et la gestion des intermittences de production sont le principal enjeu de l'insertion de la production décentralisée. Celle-ci n'est envisageable qu'à la condition de développer le stockage à grande échelle. Ceci pose en premier lieu la question du choix des technologies de stockage (dimensionnement, contrôle, temps de réponse). Le second enjeu est lié à l'intégration du stockage dans la gestion du réseau. L'utilisation du stockage est conditionnée à sa participation au réglage de l'équilibre production – consommation dans une plage de fonctionnement élargie. Le troisième enjeu est lié à la valorisation économique du stockage. Le coût de l'utilisation d'une technologie de stockage, mais également la valeur ajoutée par les fonctions ainsi apportées, doivent être estimés de manière à pouvoir situer l'intérêt économique de cette solution.

6.8. Santé-Environnement

L'énergie électrique et l'électromagnétisme sont largement impliqués dans le domaine de la santé et de l'environnement, compris ici en termes de domaines applicatifs, et qui sont loin d'être disjointes. La réponse aux problématiques posées dans ces deux domaines impose de mettre en synergie des compétences très transversales allant du génie électrique au génie des procédés en passant par les domaines des mathématiques appliquées, de la physique, de la chimie, de la biologie et de la santé. Les défis propres au domaine du Génie électrique concernent principalement 3 domaines :

- L'interaction champs électromagnétiques/vivant.
- L'interaction plasma-décharge/matière (inerte ou vivante)
- L'impact des propres technologies du Génie Electrique sur l'environnement.

Interaction champs électromagnétiques/vivant

Depuis longtemps les applications en diagnostic médical et en thérapie impliquent plusieurs communautés scientifiques. Elles sont cependant en évolution permanente, et l'optimisation des procédés existants ou

la mise au point de nouveaux moyens thérapeutiques passe notamment par une maîtrise des interactions entre champs électriques et systèmes biologiques dans lequel le génie électrique a toute sa place. De nombreuses questions restent ouvertes dans le domaine de l'interaction champs électromagnétiques/vivant. Les applications dépassent le cadre de la santé et peuvent concerner des aspects environnementaux à fort enjeux lorsque les cellules considérées sont des microorganismes bactériens (exemple la dépollution de l'eau par impulsion haute tension).

Le problème des effets sanitaires potentiels de l'exposition involontaire des êtres humains aux champs relève de la même problématique scientifique pour laquelle subsistent actuellement plusieurs verrous :

- le modèle électromagnétique et éventuellement multiphysique en tant que tel. En effet, l'action des champs électromagnétiques se situe au niveau de la cellule, voire des constituants de la cellule, alors que les champs sont appliqués à des niveaux supérieurs : tissus, organe voire organisme entier.
- la vérification expérimentale *in vivo* des résultats de simulations. Par exemple, la mesure des courants induits basses fréquences est actuellement impossible, et la mesure des échauffements en hautes fréquences très difficile.

Parallèlement aux activités de modélisation électromagnétique à l'échelle du corps humain, une partie croissante de chercheurs en Génie électrique s'investit dans le développement des biomicrosystèmes (voir partie correspondante du rapport) impliquant l'électromagnétisme, la biologie, la microfluidique, les matériaux, et la physique.

Interaction plasma-décharge/matière (inerte ou vivante)

Les plasmas ont des champs d'application qui couvrent aussi bien des aspects environnementaux (dépollution de gaz de combustion, élimination de COV – Composés organiques -, ...) que des aspects de santé (destruction de microorganismes dans les effluents liquides, de biofilms bactériens). L'amélioration de l'efficacité fonctionnelle et énergétique des procédés de traitement basés sur l'utilisation des plasmas pose de nombreux défis en termes de connaissances fondamentales et de développements technologiques :

- La compréhension des mécanismes de destruction par plasma des microorganismes planctoniques ou structurés en biofilm (stérilisation et décontamination).
- Dans le cas des traitements de dépollution en volume par procédés plasmas, de nombreuses questions scientifiques restent en suspens telles que la caractérisation complète et le contrôle des sous produits, ainsi que la compréhension locale des couplages physico-chimiques conduisant à la destruction des polluants avec ou sans catalyseurs.
- Le design des réacteurs en fonction des espèces à traiter et des conditions de fonctionnement.
- Les changements d'échelle entre des réacteurs de laboratoire fonctionnant à quelques litres par minute vers des réacteurs industriels fonctionnant à plusieurs mètres cubes par minute.
- L'élaboration de matériaux permettant de garantir

des durées de vie conséquentes.

Impact des propres technologies du Génie Electrique sur l'environnement

Cette préoccupation est de plus en plus présente en ingénierie. Elle conduit à mettre en place des démarches globales de conception visant à minimiser l'impact global des systèmes électriques tout au long de leur durée de vie. Outre l'efficacité énergétique, un des axes de développement est de mettre au point des matériaux à faible impact environnemental. On peut citer par exemple les études visant à remplacer le SF6 (gaz à effet de serre) par des mélanges gazeux à base d'azote ou dans certaines applications par des liquides isolants biodégradables.