

08

MICRO ET NANO-TECHNOLOGIES, ÉLECTRONIQUE, PHOTONIQUE, ÉLECTROMAGNÉTISME, ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Président de la section

Pierre BEAUVILLAIN

Membres de la section

José ATIENZA

Alain CAPPY

Daniel COURJON

Dominique CROS

Jacques DAVOINE

Philippe DELAYE

Stefan ÉNOCH

René FEUILLET

Jacques GAUTIER

Anne-Marie GUÉ

Marie-Laure LOCATELLI

Pascal MAIGNE

Daniel MATHIOT

Frédéric MAZALEYRAT

Denis MENCARAGLIA

Laurent NICOLAS

Nathalie ROLLAND-HAESE

Jean ROUSSET

André TOUBOUL

Nakita VODJDANI

La section 08 couvre un champ de recherches multidisciplinaires dans le domaine des micro et nanotechnologies (nanoélectronique, mémoires de stockage, nanophotonique, micro-ondes, etc.) ainsi que celui du génie électrique. Ces recherches portent sur les matériaux fonctionnels associés à l'instrumentation et la nanotechnologie poussées à leurs limites ultimes, la conception, la fabrication et la caractérisation de composants élémentaires innovants, les microsystèmes et nanosystèmes. Une approche systémique 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 principalement à la section 08. Ces thématiques bénéficient des recherches menées par les laboratoires du département Sciences et Technologies de l'Information et de l'Ingénierie rattachés aux sections 07, 09 et 10, des recherches à caractère plus fondamental menées en particulier par les laboratoires du département MPPU rattachés aux sections 04 et 06 du Comité National ainsi que des laboratoires des départements Sciences Chimiques et Sciences de la Vie. Dans la suite de ce rapport de conjoncture, l'ensemble de ces thématiques est détaillé en prenant en compte les défis scientifiques et le caractère multidisciplinaire des recherches, les collaborations menées,

leur position au plan national et au plan international ainsi que leur force et faiblesse au sein du CNRS. Enfin, une proposition de stratégie est donnée pour leur développement de chacune des thématiques. Cette partie est complémentaire du rapport de stratégie générale de la section donnée dans un autre rapport.

1 – NANOTECHNOLOGIES, NANOÉLECTRONIQUE, NANOPHOTONIQUE, NANOMAGNÉTISME

1.1 INTRODUCTION

Si les nanosciences traitent de l'étude des nano-objets individualisés, de leurs propriétés, de leur caractérisation et de leur manipulation, les nanotechnologies concernent l'ensemble des recherches et des savoir-faire permettant la fabrication de structures, de dispositifs et de systèmes à partir de procédés permettant de structurer la matière à des échelles comprises entre 1 et 100 nm. Le cœur des nanotechnologies consiste donc, par lithographie ou nanoimpression puis gravure ou dépôt et lift-off à structurer et connecter des nanostructures. Une approche complémentaire consiste à travailler à l'échelle atomique ou moléculaire afin d'assembler la matière, brique par brique, jusqu'à l'échelle macroscopique. Les nanotechnologies qui visent à l'intégration des nano-objets en dispositifs ou systèmes dont la fonctionnalité répond à un besoin précis, doivent 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.

Les principaux domaines applicatifs des nanotechnologies concernent l'information et la communication, les matériaux, mais également la santé et l'énergie. Quelle que soit l'ap-

plication visée, les chercheurs doivent, en fait, faire face à deux grands défis :

Élaborer, observer et caractériser des objets nanométriques

De façon transversale aux différentes applications, le développement des nanotechnologies nécessite le développement d'outils spécifiques qui permettent la conception, la fabrication et la caractérisation de nano-objets. À cette fin, les différentes techniques de microscopie à champ proche sont des outils simples et efficaces, excepté leur inaptitude à la fabrication collective, qui s'avère pourtant nécessaire afin de réduire les coûts et/ou de fabriquer sur des grandes surfaces. Les techniques de lithographie utilisant des particules accélérées (ions ou électrons) se révèlent très performantes du point de vue de la résolution mais souffrent du même inconvénient que les microscopes à champ proche quant à leur productivité. 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) voire de grands instruments (ESFR, Soleil, etc.). Notons que la caractérisation des nanostructures nécessite de développer une métrologie spécifique qui, le plus souvent, utilise des outils et équipements identiques à ceux utilisés dans les étapes de fabrication. Dans ce domaine, de nombreux laboratoires du CNRS rattachés à la section 08 du comité national possèdent une reconnaissance internationale.

Construire de véritables nanosystèmes

Associer des nano-objets afin d'améliorer les performances de dispositifs ou de systèmes ou obtenir de nouvelles fonctionnalités constitue un objectif difficile mais passionnant. Dans la majorité des applications, le passage nano-objet individuel à système de nano-objets (nanosystèmes) n'est pas trivial et ce passage nécessite souvent une technique mixte asso-

ciant approche descendante (top-down) et ascendante (bottom-up). Notons que, même si elle est très séduisante, la fabrication par auto-assemblage ou auto-organisation n'en est qu'à ses débuts, même si des résultats prometteurs ont été obtenus avec des nanocristaux ou des nanoparticules. Le passage nano-objet vers nanosystèmes 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, passage obligé pour un transfert efficace du laboratoire vers l'industrie, n'est que peu abordée dans les laboratoires académiques alors que les retombées potentielles sont considérables. Il est de plus en plus clair que les nanotechnologies n'auront des applications à grande échelle que si les techniques de conception des nanosystèmes progressent de façon significative.

1.2 LES GRANDS DOMAINES DES NANOTECHNOLOGIES

Dans les domaines scientifiques relevant de la section 08, la nanoélectronique, la nanophotonique et le nanomagnétisme ont connu ces dernières années des avancées considérables et sont porteuses de très nombreuses applications. Il convient de noter que la communauté concernée par les nanotechnologies de la nanophotonique en France est globalement bien structurée. Les raisons sont, d'une part, le rôle extrêmement positif des GDR Nanoélectronique, Ondes et Sésame qui couvrent l'ensemble du domaine scientifique. D'autre part, la création d'un réseau national de grandes centrales de technologie pour la Recherche Technologique de Base (IEF, IEMN, FEMTO-ST, FMNT, LAAS, LPN) avec l'achat d'équipements de pointe récents a permis l'accès aux technologies de pointe au plus grand nombre et joue, bien entendu, un rôle fédérateur important. Ces éléments ont sans aucun doute permis aux laboratoires français de se positionner comme acteurs

importants dans le monde, et en particulier en Europe. Ainsi, le CNRS est présent dans les principaux réseaux d'excellence européens portant sur la nanoélectronique (SiNano, NanoCMOS, PHANTOMS), la nanophotonique (Phoremest, Plasm nano-devices, ePIXnet, NEMO, Nano2Life, Metamorphose).

La nanoélectronique

Au plan sociétal, les enjeux liés au développement de la nanoélectronique sont très importants, en raison des fortes perspectives applicatives offertes par l'accroissement de la puissance de traitement des données et par l'augmentation des capacités de stockage et de communication de l'information. Le progrès technologique rend possible la réalisation de nouveaux objets et fonctions dont certains donnent lieu à des marchés considérables. Depuis le PC, internet, la téléphonie cellulaire, la photographie digitale, les lecteurs MP3 et les étiquettes RFID ou autres circuits télé-alimentés, le GPS, la télévision haute définition et l'ambiance intelligente, l'éventail applicatif ne cesse de s'élargir et de se diversifier. Entre recherche-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, car elle en constitue un maillon essentiel. Pour être la plus efficace possible, cette recherche doit être structurée et complémentaire des recherches à caractère plus appliqué ou industriel, et, pour bénéficier d'un maximum de synergie, elle doit être menée en interaction avec les organismes correspondants.

Reprenant l'analyse qui a été effectuée par l'ENIAC (1), plate-forme technologique européenne pour la nanoélectronique, trois grandes directions peuvent être dégagées :

Vers la fin de la « loi de Moore »

Les principaux défis scientifiques et techniques à relever, à moyen terme (10-15 ans), pour maintenir le rythme d'évolution des

technologies micro-nano-électroniques (loi de Moore) et les jalons correspondants sont détaillés dans la dernière feuille de route de la micro-électronique (« ITRS roadmap »). Les enjeux sont importants pour la filière microélectronique elle-même, sachant que la dynamique de progrès, qui repose essentiellement sur une approche de miniaturisation, doit faire face à des difficultés croissantes pour la réalisation de structures de plus en plus petites et pour l'obtention de dispositifs fonctionnant encore de façon optimale. L'augmentation de la densité de puissance consommée, avec notamment la contribution croissante des courants de fuite, pose également question pour la réalisation de circuits et systèmes complexes qui se veulent par ailleurs de plus en plus performants. Les différents freins ou limites potentielles correspondants sont bien identifiés avec, à terme, la butée liée à la discrétisation de la matière. Il y a toutefois de nombreuses voies de progrès à explorer, soit pour prolonger celles qui ont déjà fait leur preuve, soit pour dégager de nouveaux concepts, en rupture avec les solutions en place.

Une première direction repose sur le remplacement de matériaux par d'autres qui présentent des propriétés mieux adaptées aux objectifs visés. À titre d'exemple, on peut citer les diélectriques à haute permittivité pour les grilles des transistors MOSFET, les très basses permittivités et xérogels pour les interconnexions, les alliages de semi-conducteurs IV-IV et le germanium pour les couches actives, les siliciures ou germaniures correspondants, et les nouvelles grilles métalliques. Comme, par ailleurs, le volume des structures élémentaires va en diminuant, le rôle des interfaces va en croissant. Outre les matériaux eux-mêmes, les techniques et procédés d'élaboration doivent être sans cesse améliorés, voire remplacés, compte tenu de cahiers des charges plus exigeants aussi bien sur le plan des résolutions à atteindre que sur celui des précisions et reproductibilités à garantir. Cela concerne en premier lieu le dopage des semi-conducteurs, notamment jonctions des MOSFET et profil de dopage des transistors bipolaires, et les recuits associés, mais cela concerne également tous les dépôts ou croissances de couches, ces

dernières étant de plus en plus fines, et les gravures associées. Tout cela requiert des études approfondies en science et technologie des matériaux, en techniques de caractérisation morphologiques et physico-chimiques et en modélisation et simulation multi-échelles.

Une deuxième direction d'investigation, complémentaire, porte sur l'architecture même des composants élémentaires (SOI localisé, structures multi-grilles, canaux contraints, ingénierie source/drain, etc.) et leur mode de fonctionnement (effets quantiques, transport balistique, etc.). Un des grands objectifs est l'amélioration des caractéristiques de transport des transistors, sans dégradation de leur fiabilité et en minimisant les éléments et effets parasites (résistances d'accès, effets électrostatiques, courants de fuite, etc.). Il s'agit, entre autres, de tirer parti de tous les degrés de liberté offerts par l'ingénierie des structures de bandes, en jouant sur la composition des matériaux, les contraintes mécaniques et l'orientation cristalline. Un changement de mode de fonctionnement peut, par ailleurs, présenter des avantages considérables, par exemple en dépassant la limite de pente inverse sous le seuil de 60 mV/déc. à 300 K imposée par l'injection thermo-ionique des porteurs. À cette fin, outre de l'inventivité, la recherche d'une compréhension approfondie des mécanismes entrant en jeu est essentielle aussi bien pour l'élaboration des matériaux et des structures que pour le fonctionnement physique des dispositifs.

Les dispositifs de mémorisation de l'information jouent un rôle déterminant dans de nombreux circuits et applications. La demande en dispositifs ultra-miniaturisés est très forte et toujours en croissance, notamment pour les mémoires non volatiles. Il est donc particulièrement important de pousser au maximum la miniaturisation des dispositifs de stockage de charge constituant les mémoires flash (matériaux à fortes permittivités, piégeage localisé, optimisation de barrières, structures multi-bit ou multi-valuées, etc.). Là encore, les études à effectuer vont du matériau aux mécanismes de transport des porteurs de charges, en intégrant les aspects statistiques et stochastiques

intervenant dans la réalisation et le fonctionnement des dispositifs.

Bien structurée autour des acteurs majeurs que sont STMicroelectronics au plan industriel et le LETI en R&D notamment pour les aspects d'intégration technologique, la communauté scientifique française est bien positionnée dans le contexte européen, où elle est fortement impliquée dans les principaux programmes du 6^e PCRD du domaine dont SINANO animé par l'IMEP. Les laboratoires concernés, couvrant un très large champ de compétences, semblent bien armés pour mener à bien le nécessaire accompagnement de R&D requis pour relever le défi de repousser au plus loin les limites de l'approche descendante («top-down») que représente l'extrapolation de la «loi de Moore». Les principaux verrous nécessitant un investissement particulier sont résumés ci-dessous :

- développer des techniques de lithographie optique ultimes ou alternatives («mask-less», nano-impression, auto-assemblage dirigé combinant les approches «top-down» et «bottom-up», etc.) et les techniques de caractérisation associées ;

- développer les technologies utilisant des matériaux alternatifs compatibles «silicium» (diélectriques à forte permittivité pour la grille, diélectrique à faible permittivité pour interconnexions, germanium ou alliages, etc.) ;

- développer les outils de simulation (TCAD) et caractérisations correspondants ;

- modélisation physique des structures ultimes (prise en compte des effets quantiques et fluctuations statistiques) et des nouvelles architectures de composants (multi-grilles) et développement des outils de simulation correspondants ;

- recherche de solutions pour réduire les fuites dans les composants.

Au-delà du CMOS

Pour préparer l'avenir à plus long terme, il est impératif d'explorer des voies alternatives qui pourront venir en substitution ou en com-

plément à l'existant. Un champ potentiellement fertile d'investigation est celui de la croisée des disciplines, nanotechnologies et chimie par exemple, mais aussi physique mésoscopique et voire même biologie. Ainsi, les nanotubes de carbone, eu égard à leurs propriétés exceptionnelles à plus d'un titre, constituent un matériau de choix pour la réalisation de nombreuses fonctions (transistors, capteurs, NEMs, interconnexions, etc.), à condition, toutefois, qu'un minimum de maîtrise puisse être atteint quant à la reproductibilité de leurs caractéristiques. Découpé sous forme de fils, le graphène en permettrait-il un meilleur contrôle, sans dégradation des propriétés électroniques qui font l'intérêt des nanotubes ? Les structures mono-dimensionnelles semiconductrices («nanofils») offrent aussi un riche potentiel pour la fabrication d'une variété de dispositifs (transistors, RTD, lasers, capteurs, etc.), incluant la possibilité d'embarquer des semi-conducteurs composés sur les substrats conventionnels. L'ingénierie moléculaire constitue par ailleurs une source très ouverte pour la conception de fonctions élémentaires, telles que commutateurs, points mémoires, capteurs, etc., aussi bien dans une optique d'intégration ultra-dense, voire 3D, que pour des applications de type électronique souple. Enfin, si l'exploitation de la granularité de la charge électrique (SET, SEM) n'a pas encore réussi à percer, l'exploitation du spin électronique est très prometteuse au niveau des mémoires et des fonctions logiques.

Toutes ces voies impliquent également que des investigations approfondies soient menées au niveau matériau, simulation et modélisation afin de bien appréhender les mécanismes intervenant dans l'élaboration ou le fonctionnement des dispositifs. De plus, il ne suffit pas de savoir fabriquer des nano-objets ou nanostructures par approche ascendante, car, même si l'on parvient à obtenir une reproductibilité suffisante, leur placement contrôlé à une échelle nanométrique est indispensable pour atteindre une densité d'intégration en rapport avec leurs dimensions. Dans le cas de l'électronique souple ou en grande surface, ou dans le cas de l'utilisation sous forme de cluster, cette dernière contrainte peut toutefois être

relâchée. Par ailleurs, le passage du nano-objet au nano-composant n'est pas immédiat, car il y a un délicat travail d'intégration à effectuer, ne serait-ce que pour minimiser les éléments et effets parasites. Il apparaît aussi essentiel d'associer des réflexions portant sur le plan architectural et système, sachant que des approches hybrides avec le CMOS sont à considérer et qu'il faudra tôt ou tard introduire une tolérance aux défauts de fabrication et aléas de fonctionnement des circuits, y compris pour les réalisations par auto-assemblage dirigé ou programmé. Dans ce but, le développement de modèles « compact » de ces nouveaux dispositifs est indispensable pour permettre leur introduction dans les outils de simulation des circuits.

Les recherches permettant de répondre à ces besoins sont par nature très pluridisciplinaires et transversales à plusieurs départements scientifiques du CNRS. Cette richesse thématique de l'organisme est une opportunité à exploiter au mieux en favorisant l'émergence de programmes de recherche amont interdépartementaux gardant en ligne de mire la finalité « dispositif ». Quelques axes importants sont signalés ci-dessous :

- matériaux, composants et systèmes pour l'électronique de spin ;
- structures et hétérostructures monodimensionnelles (nanotubes de carbone, nanofils) ;
- concepts nouveaux et composants pour une consommation énergétique minimale (électronique à peu d'électrons, codage alternatif de l'information, etc.) ;
- électronique moléculaire compatible CMOS pour une intégration hybride ;
- nouveaux dispositifs de mémorisation de l'information.

À côté de « Moore »

Au-delà de la course à la miniaturisation, les nanotechnologies appliquées à l'électronique ouvrent la voie au développement

de nouveaux concepts permettant l'intégration « sur silicium » de fonctions non standard riches en applications. Sont par exemple concernées les applications spécifiques « haute tension », « faible puissance », RF, ou l'intégration de capteurs analogiques divers ainsi que des fonctions optiques. En élargissant aux systèmes complexes, on peut également citer les « biochips » et la microfluidique qui tirent parti de telles intégrations hétérogènes. Là encore, les solutions passent par des recherches pluridisciplinaires sur les nouveaux matériaux impliqués, leur compatibilité avec les technologies « standard », la modélisation avancée des phénomènes physiques mis en jeu et leur caractérisation. Plus généralement, ce rapprochement de disciplines, appelé encore convergence NBIC (Nanosciences, Biologie, Informatique, Sciences de la Cognition), est à encourager car il est source potentielle de nombreuses innovations et applications.

Les actions prioritaires sont développées dans les thèmes microsystèmes et nanotechnologies.

Forces et faiblesses

La communauté nationale de la microélectronique, couvrant à travers ses divers laboratoires un large spectre disciplinaire (science des matériaux, physique et technologie des composants, systèmes électroniques), a bien intégré l'évolution générale vers les nanotechnologies et elle s'est structurée en conséquence, notamment avec le GDR Nanoélectronique et la mise en place des réseaux de centrales technologiques. Elle est par ailleurs très engagée dans le Réseau d'excellence SiNano et participe activement aux projets nationaux ou européens. Les laboratoires CNRS concernés ont également une longue tradition de collaboration avec le milieu industriel.

Toutefois, on peut noter une implication au niveau système encore assez limitée (ACI Nanosys, etc.), alors qu'il y a là un important potentiel d'innovation et de progrès. Le développement d'interactions avec la communauté des concepteurs et des informaticiens peut en

effet conduire à de nouvelles approches pour traiter les données et l'information ou pour trouver des solutions aux problématiques de consommation d'énergie et de variabilité technologique. La recherche de systèmes tolérants aux fautes et défauts ou de nouvelles façons de coder ou représenter l'information peut ainsi se traduire par l'émergence de nouveaux composants. Un cas emblématique de rupture est celui des architectures neuromimétiques qui brisent la césure entre unités de calcul et de mémorisation. Les architectures programmables et l'intégration tridimensionnelle requièrent également une approche holistique.

Pour tirer pleinement parti des nanotechnologies, les interactions doivent aussi se renforcer avec la communauté des physiciens et des chimistes.

Photonique et nanophotonique

La photonique et la nanophotonique sont des domaines de recherche qui visent à contrôler la propagation des photons et renforcer leur interaction avec la matière dans le volume le plus restreint possible. Cela implique la maîtrise des sources lumineuses et d'objets de dimensions sub-micrométriques avec une résolution de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres à quelques nanomètres, soit un vrai défi nanotechnologique. Les nouveaux composants plus compacts permettront de créer de nouveaux schémas et fonctions optiques en diversifiant par-là même les perspectives d'applications aux télécommunications optiques, à la visualisation et à la biologie. La réalisation des nanostructures photoniques impose la nécessité « d'ajuster » dans les domaines spatial et spectral les nanostructures électroniques (fils, boîtes quantiques, etc.) au champ optique. La croissance des matériaux actifs doit être parfaitement maîtrisée pour contrôler les nanostructures électroniques en taille, densité, composition et localisation avec des exigences technologiques considérables.

Parmi les stratégies de confinement des photons, les cristaux photoniques bidimensionnels (CP2D) combinés à la stratégie réfrac-

tive pour le confinement vertical des photons en configuration d'optique guidée sont considérés comme la structure d'avenir pour le contrôle ultime de la lumière dans les domaines spatial et spectral (piégeage en régime de bande interdite photonique, ralentissement des photons en régime de modes de Bloch lents). C'est dans le domaine des CP2D semi-conducteurs avec l'approche dite « membrane » à fort confinement vertical, que les percées les plus spectaculaires ont été obtenues : micro-cavités submicroniques à très fort facteur de qualité pour l'électrodynamique quantique « solide », micro-lasers à très faible seuil compatibles avec l'intégration photonique à large échelle, dispositifs non-linéaires tout optiques à très faible énergie de commande optique (commutateurs, bistables, amplificateurs optiques), une variété de composants passifs (guides, filtres, routeurs). Cette approche est compatible avec l'intégration hétérogène des matériaux III-V et du silicium. Par ailleurs, l'utilisation du niobate de lithium (LiNbO_3) permet l'association d'un cristal photonique et d'un cristal phononique et ouvre la voie à une grande variété de dispositifs compacts permettant le contrôle de signaux optiques avec un signal de commande (électrique, optique) de très faible énergie. De même les cristaux magnéto-photoniques sont une voie alternative aux cristaux photoniques commandables et permettront d'explorer des effets inédits associés à l'existence de modes électromagnétiques dits « gelés ».

La mise en œuvre des concepts de cristaux photoniques dans les fibres optiques de nouvelle génération, combinant réfraction et diffraction, a conduit à une explosion d'applications (amplification optique et lasers ; conversion de longueur d'onde et traitement tout optique ; spectroscopie et capteurs) en tirant parti du caractère extrêmement générique de cette configuration, qui est encore loin d'avoir donné toute sa mesure.

Les métamatériaux, assemblages périodiques sub-longueurs d'onde de matériaux constituent des supports lumineux qui présentent des propriétés liées à cette nouvelle approche d'un milieu effectif. À titre d'exemple, les

métamatériaux dotés d'une permittivité diélectrique et d'une perméabilité magnétique (effectives) négatives devraient permettre notamment la réalisation de lentilles plates présentant une résolution en deçà de la limite de diffraction. Ce domaine en plein essor suscite un énorme intérêt dans la communauté des électromagnéticiens, du visible au TéraHertz.

La plasmonique associe le confinement des photons et les phénomènes d'exaltation de champ associés aux nano-objets métalliques (plasmons de surface, plasmons localisés, etc.). La valeur ajoutée qu'apporte les métaux est la possibilité de confiner la lumière à des échelles bien inférieures à la longueur d'onde. En termes d'applications, la plasmonique présente un intérêt majeur pour l'optimisation de l'extraction de lumière dans des dispositifs de type LED ou OLED, pour la détection localisée de molécules individuelles, les tests biologiques miniatures ainsi que la réalisation de capteurs biochimiques et, plus généralement, la réalisation de nanodispositifs assurant à la fois sur un même support la propagation de signaux lumineux et le transport de courants électriques.

La recherche en matière de composants photoniques s'articule autour d'un certain nombre d'axes forts :

- sources laser à fibre et maîtrise des processus non linéaires dans lesquels des caractéristiques ultimes sont activement recherchées : impulsions brèves, très haute puissance, très haute cadence (> 100 GHz), qualité spatiale et agilité en longueur d'onde ;

- composants et systèmes pour l'information quantique. Le couplage fort d'atomes et de photons dans des nanostructures ouvre la voie vers de nouveaux dispositifs optiques : lasers sans seuil, sources de photons uniques pour la cryptographie quantique, nanodispositifs à boîte quantique unique en microcavité unimodale ;

- composants pour fonctions optiques et télécoms : Le secteur des télécoms/datacoms est très demandeur de composants optoélectroniques aux performances accrues (rapidité, efficacité, étendue spectrale, compacité, robustesse et faible coût) et orientées vers des fonc-

tions identifiées : régénération, conversion de longueur d'onde, routage, gestion de retards optiques, etc. ;

- composants opto-THz : Le domaine des ondes THz connaît un engouement justifié par les nombreuses applications entrevues (imagerie, médecine, environnement, sécurité militaire, télécommunications, etc.) et les détecteurs de rayonnement méritent d'être optimisés, en particulier pour construire des caméras vidéo THz ;

- intégration optoélectronique : l'optoélectronique 2D évolue vers un haut niveau d'intégration, avec une densité de composants qui se rapproche de celle de la microélectronique, grâce à une taille de dispositifs de l'ordre de la longueur d'onde, ce qui passe par des structures à fort contraste d'indice optique. Les matériaux de choix sont : le SOI (fonctions passives), les semiconducteurs III-V (sources, photodétecteurs), et les alliages SiGe ;

- composants organiques pour la visualisation : parmi les solutions alternatives au silicium polycristallin, les nanotubes de carbone (s-CNT) et les nanofils semiconducteurs (s-NW) présentent des mobilités de porteurs de 2 à 3 ordres de grandeur plus élevés. On envisage aussi la réalisation de dispositifs tout organiques avec circuit d'adressage en électronique « plastique » (transistors à base de matériaux organiques). Une autre utilisation des semi-conducteurs organiques est la conversion photovoltaïque.

La microscopie optique en champ proche si elle n'a pu s'affirmer comme la microscopie à force atomique, a permis ces dernières années de mieux comprendre les mécanismes et les couplages entre matière et rayonnement au niveau nanométrique. De nombreux travaux théoriques et de modélisation se sont inspirés des travaux effectués dans la zone des champs progressifs, seule reconnue intéressante jusque dans les années 90. Les méthodes issues des développements de Rayleigh, les modèles adaptés des travaux de Petit, Nevière et Maysre de Marseille, ou encore les modèles dipolaires et multipolaires issus de la physique moléculaire, ont fait de la France un des pays

pilotes dans l'analyse et la modélisation des champs non propagatifs. La transposition aux ondes visibles de la FDTD utilisée depuis plusieurs décennies dans le domaine hertzien a conduit un grand nombre de laboratoires français à se doter de ce type d'outil de modélisation soit commercial soit, ce qui est le cas le plus courant, « home made ».

Une des conséquences collatérales du développement de la microscopie en champ proche est la prise en compte dans le domaine optique des propriétés électromagnétiques des champs. Grâce à la capacité des microscopes à champ proche à détecter les composantes du champ (et non pas simplement le flux du vecteur de Poynting, comme en microscopie des champs progressifs), il est désormais possible d'envisager de développer de nouveaux capteurs de champs aux structures complexes et capables de détecter au choix les composantes E ou H. Appelés nano-antennes, ils s'inspirent directement des antennes utilisées dans les domaines hertziens. À noter que le domaine térahertz, s'il est déjà extrêmement intéressant en soit, peut être considéré comme un moyen de tester le comportement de ces antennes dans des conditions technologiques moins sévères (par microfabrication au lieu de nanofabrication) tout en restant très proche de l'optique du visible.

Cela dit, la microscopie en champ proche continue son évolution même si la microscopie confocale reste la solution technologique optimale au plan de la maniabilité et de l'exploitabilité des images. La spectroscopie, dont la spectroscopie Raman, l'analyse de molécules uniques, la fluorescence ainsi que la nanolithographie, la nano-manipulation, la caractérisation sub-longueur d'onde des composants photoniques, ainsi que l'étude des milieux biologiques restent les grands champs d'investigation de ce type de microscopie. Parallèlement au développement du champ proche, les techniques de microscopie en champ lointain utilisant des effets non linéaires (déplétion de fluorescence, quenching, etc.) permettent maintenant d'obtenir des résolutions spatiales similaires à celles obtenues en champ proche optique. Par ailleurs ces techniques se prêtent

bien à l'exploration de nouveaux mécanismes de contraste basés sur des effets d'optique non linéaire ou de mise en forme spatio-temporelle d'impulsions courtes. Ces technologies doivent être développées pour les appliquer dans la caractérisation de composants et d'échantillons biologiques.

La photonique se développe aussi en dehors de ses aspects miniaturisés à l'échelle nanométrique. Ses défis actuels se situent en grande partie dans le développement de systèmes qui intègrent les possibilités actuelles des technologies et des matériaux pour couvrir des champs nouveaux pour l'émission, le contrôle, la propagation et la détection de la lumière. Les principales thématiques abordées sont :

- l'association d'architectures de sources originales avec les nouveaux matériaux laser (massifs ou en guide) conduit à la réalisation de systèmes laser pompés par diodes, appelés « tout solides », qui couvrent une gamme spectrale de plus en plus large, par génération d'harmoniques et amplification paramétrique. La compacité, le rendement énergétique, la qualité spatiale de faisceau et le profil temporel d'impulsion sont autant de paramètres qui ouvrent un volant nouveau aux systèmes photoniques ;

- la bande spectrale accessible aux méthodes optiques s'est considérablement accrue par la capacité à réaliser des composants de l'extrémité de l'infrarouge vers les micro-ondes jusqu'aux rayons X mous, dont l'application va de la production d'impulsion attoseconde à l'imagerie des plasmas ;

- l'association entre instrumentation optique et traitement du signal bénéficie des avancées en performances de l'informatique et des progrès théoriques en traitement du signal, ce qui se manifeste directement sur la conception des systèmes, qu'il s'agisse d'imagerie (microscopie non linéaire, tomographie optique cohérente, spectro-imagerie, etc.), d'appareillage optique (pince optique, micro-endoscopie, sources de photons uniques, etc.) ou de capteurs optiques (biopuces optiques, etc.).

Forces et faiblesses

Les laboratoires du CNRS contribuent aux recherches fortement pluridisciplinaires en photonique qui fournissent le cadre à de nombreuses collaborations entre les laboratoires de différents départements (ST2I et MPPU principalement) et qui s'effectuent en liaison étroite avec le monde industriel. Les recherches plus récentes en nanophotonique se sont appuyées sur deux points forts de la communauté française : la modélisation du champ électromagnétique y compris le champ proche et sa validation expérimentale. En effet, une caractérisation fine des nanocomposants optiques passe le plus souvent par la mesure du champ proche optique, un objectif affiché étant le contrôle de la lumière à des dimensions sub-longueur d'onde. La modélisation électromagnétique en optique a été largement développée en France et le CNRS peut compter sur une force importante dans ce domaine. Néanmoins un effort d'harmonisation et de mise en commun de logiciels semble nécessaire. Cette démarche a déjà été initiée par le GdR Ondes mais devrait se renforcer. La biophotonique est un axe de recherche fortement pluridisciplinaire qui souffre peut être d'une certaine dispersion et qui mériterait une meilleure harmonisation institutionnalisée entre le développement de nouveaux instruments et de techniques d'imagerie et leur usage en biologie et médecine.

Nanomagnétisme

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication nécessitent une quantité toujours croissante de la capacité de stockage digital non volatil. Pour résoudre ce besoin, le disque dur reste une technique majeure avec une évolution industrielle récente vers l'enregistrement perpendiculaire. Pour ce type de média discret le contrôle de la topologie (taille, distribution des particules) et des interactions magnétiques constitue un enjeu majeur tant au plan fondamental qu'appliqué. Le même problème se pose dans les matériaux massifs nanostructurés pour les

applications du génie électrique. En effet, le contrôle de ces interactions, au travers des propriétés magnétiques des nanograins et de l'interface, permettrait de maîtriser les propriétés macroscopiques de manière à obtenir des matériaux soit très durs (aimants composites dur/doux « spring magnets » pour les machines électriques), soit, au contraire, très doux (nanocristallins ou nanocomposites pour l'électronique de puissance haute température ou haute fréquence). Plus marginalement, on attend également beaucoup des nanoparticules magnétiques en hyperfréquences (filtre, circulateurs, etc.) et pour les applications en biologie dans lesquelles les nanoparticules super-paramagnétiques jouent le rôle de marqueurs pour la manipulation, la détection ou le chauffage d'entités biologiques (virus, cellules, ADN, etc.). Ces recherches concernent également les têtes de lecture et, plus généralement, les capteurs magnétiques. De nouvelles structures de capteurs sont en cours de développement comme la jonction tunnel magnétique, la vanne de spin en courant perpendiculaire, le filtre à spin, etc. L'incorporation de nouveaux matériaux à plus forte polarisation de spin (oxydes magnétiques et semiconducteurs magnétiques, par exemple) est un sujet d'actualité. Par ailleurs, la fréquence limite de ces capteurs devra largement dépasser le GHz avec une dynamique de retournement de l'aimantation dans une nanostructure magnétique optimisée pour obtenir une vitesse élevée et une faible consommation tout en conservant les critères de non-volatilité. Enfin, une technologie de type MEMS-NEMS devrait apparaître à terme dans le disque dur.

Le développement d'un stockage de masse mobile (cartes mémoires, clé USB) est une évolution du domaine appelée à se développer fortement. Ce stockage demande un accès aléatoire de la mémoire et sa miniaturisation, une faible consommation d'énergie et une vitesse suffisante pour traiter des masses de données importantes. Aujourd'hui dominent très nettement les mémoires RAM Flash qui semblent miniaturisables au moins jusqu'à la génération MOS 65 nm. Les mémoires non volatiles sont utilisées pour le stockage et également dans un nouveau champ émergent,

celui de la « logique programmable ». Trois technologies se partagent actuellement cette compétition : la mémoire ferro-électrique (FeRAM), la technologie PMC Programmable Metallic Cell ou CB-RAM (Conductive Bridging RAM) et la mémoire magnétique à accès aléatoire (MRAM). Pour cette thématique dans laquelle les laboratoires français sont à la pointe au plan international, les développements récents sont liés à l'électronique de spin et au renversement rapide de l'aimantation : écriture ultrarapide en mode précessionnel, écriture thermiquement assistée par injection d'un courant de chauffage à travers la cellule et écriture directe par injection de courant polarisé en spin.

De nouvelles recherches en architecture de circuits permettent d'envisager le développement d'une logique entièrement magnétique, basée sur la manipulation de domaines magnétiques, ou de nanostructures magnétiques en interaction pour réaliser des calculs sans avoir recours à l'électronique. À plus long terme dans le domaine de la spintronique, il existe déjà des propositions d'ordinateur quantique. Ces objectifs relèvent encore d'une recherche très fondamentale mais ils dépendent aussi de la nécessité de contrôler, par des méthodes artificielles ou d'auto assemblage, l'intégration de nanostructures « magnétiques » dans des composants et circuits monoélectroniques.

Forces et faiblesses

La communauté française en électronique de spin et nanomagnétisme a une renommée internationale bien établie depuis de nombreuses années. Les collaborations récentes avec la communauté semiconducteurs magnétiques, initiée par le GdR Sésame sont à renforcer, de même que celles avec la nanoélectronique pour l'intégration de l'électronique de spin sur silicium. Par ailleurs il faut noter le faible nombre de chercheurs et enseignants chercheurs dont l'activité scientifique est centrée sur les nanomatériaux magnétiques.

1.3 LA PERSPECTIVE STRATÉGIQUE « NANOTECHNOLOGIES »

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 la formation des projets interdisciplinaires et des plates-formes technologiques permettant le développement de ces projets.

Ce sont par exemple :

- les outils unifiés pour la modélisation, la simulation et la conception de nanosystèmes ;

- 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 ;

- favoriser 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.

De façon plus précise, les perspectives stratégiques en sept points sont proposées :

Phénomènes et procédés fondamentaux propres à l'échelle nanométrique

Les véritables ruptures technologiques relèveront de principes de fonctionnement résolument nouveaux exploitant les effets physiques propres aux dimensions nanométriques. Il faut donc favoriser les recherches 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.

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.) 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.

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, dans le but de dépasser l'état de l'art mais également, en incluant des matériaux nanostructurés, par exemple créer de nouvelles fonctionnalités. Les aspects scientifiques et technologiques doivent évidemment se situer aux dimensions nanométriques mais les systèmes et les dispositifs eux-mêmes ne sont pas limités à ces dimensions 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 nano-objets.

Recherche en instrumentation et en 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. Il est donc impératif de soutenir les recherches et le développement d'une nouvelle génération d'équipements de modélisation, de caractérisation, de synthèse, de mesure, de matériaux, 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 le laboratoire mais également l'industrie ; les possibilités d'automatisation, et les aspects de normalisation ne doivent pas être oubliés.

La nanofabrication

À 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 une approche descendante (top-down) ultra miniaturisée et ascendante (bottom-up) de plus en plus complexe ou par auto-assemblage. L'architecture associée à ces nano-objets devra également tenir compte de la dispersion en taille inhérente à ces nouvelles approches.

Les équipements de recherche

Compte tenu des efforts financiers considérables qui sont consentis par de nombreux pays pour développer les nanotechnologies, il devient de plus en plus important d'accroître le nombre et d'améliorer la qualité des équipements mis à la disposition des chercheurs. Il

faut à la fois développer les équipements spécialisés localisés dans les meilleurs laboratoires du domaine et les grands équipements et plates-formes nationales qui sont à la disposition de l'ensemble de la communauté de recherche nationale. La mise en réseau des grandes centrales de technologies et leur reconnaissance comme un grand instrument national doit être une priorité.

Les dimensions éthiques et sociétales

Le développement futur des nanotechnologies n'est pas sans poser de nombreux problèmes éthiques et sociétaux. 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 ;

- impact sur les méthodes d'enseignement et sur l'éducation scolaire et universitaire ainsi que sur l'information du grand public ;

- identification et mesure des conséquences sur la société au sens large : répercussions sociales éthiques et légales, répercussions économiques sur l'emploi, répercussions sur la formation et l'éducation.

2 – COMPOSANTS ET CIRCUITS DES RF AU THZ

Avec l'émergence de nouveaux concepts et systèmes d'information et de communication entre objets intelligents permettant une communication ubiquitaire et des nouveaux standards de communication sans fil grand public, les composants et les circuits électroniques connaissent un fort développement visant à augmenter leurs performances tout en rédui-

sant leur taille, leur consommation et en offrant de plus un degré d'intégration toujours plus important.

La Roadmap ITRS prédit des composants CMOS silicium avec une fréquence de coupure très supérieure à 200 GHz d'ici 2010 ce qui confinerait les composants III-V dans des marchés de « niche » (puissance, linéarité, commutation, dispositifs à forte dynamique, composants THz).

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 soient réduits aux seules fonctions d'amplification de puissance ou à faible bruit et de conversion de fréquence et de filtrage.

2.1 COMPOSANTS ET CIRCUITS ACTIFS

- Les filières Silicium CMOS et BICMOS SiGe dominent le marché des circuits numériques et mixtes analogique-numérique à faible consommation et bas coût. Les filières III-V notamment InP offrent cependant, malgré leur coût des caractéristiques supérieures à celles du silicium en terme de linéarité, de dynamique, de montée en fréquence et de compatibilité avec les systèmes optiques. La maîtrise de la croissance métamorphique d'hétérostructures de la filière InP sur substrat GaAs tend à se généraliser et permet de lever les problèmes liés aux substrats InP.

Par ailleurs la filière InP devrait permettre la réalisation de sources THz par une conception optimale de la structure des composants (HEMT double grille, TBH à collecteur en haut, etc.). Les filières à base de composés antimo-

niés sont aussi une alternative crédible pour la réalisation de composants sub-millimétriques à très faible consommation. Les applications de cette gamme de fréquence sont multiples : imagerie biologique, radar anti-collision, sécurité, analyse de polluants dans l'atmosphère et en biophysique.

Aux fréquences plus basses, les composants à l'état solide à base de composés nitrures (GaN) permettront à terme de gagner un facteur 10 sur le dimensionnement des systèmes télécoms et radar. Si l'on ajoute à ces caractéristiques la forte mobilité du gaz d'électrons dans ces hétérostructures, on obtient des composants qui réalisent un excellent compromis puissance-fréquence jusqu'à environ 100 GHz, à l'heure actuelle. Sur ce matériau les efforts actuels visent à réaliser des circuits intégrés de puissance MMIC (projet européen Korrigan), mais pour exploiter à fond cette densité de puissance élevée. Des travaux de fiabilité sont encore nécessaires. L'inconvénient majeur de ces matériaux est sa difficile intégration avec la technologie Silicium, même si actuellement des études sont réalisées pour associer ces deux matériaux. Sur ce même thème des composants semi-conducteurs de puissance, la technologie diamant laisse envisager de meilleures performances en terme de puissance liées à un fort gap, et à une dissipation thermique plus élevée que celle du GaN. Sur ce thème, des études ont été engagées mais la réalisation de composants est encore lointaine.

Dans le domaine des sources, une des priorités consiste 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. La montée en fréquence repose sur un verrou technologique lié à la miniaturisation des composants. Les solutions semi-conducteurs, reposent sur l'utilisation des technologies SiGe et surtout InP dont les premières réalisations montrent des résultats qui se rapprochent de ces fréquences THz. Elles offrent la possibilité de réaliser des sources à l'état solide de faible volume. Néanmoins, elles ne permettront pas d'obtenir des niveaux de puissance élevée nécessaires dans certaines applications. Aussi

de nouvelles voies sont explorées comme par exemple les dispositifs à micro-tubes électroniques dont la miniaturisation est possible grâce aux techniques de micro-usinage. Ces composants, permettent de générer de fortes puissances, et pourront trouver de nombreuses applications dans le domaine de la sécurité et du biomédical. Une autre priorité du domaine des sources est la synthèse de fréquences digitales dont la mise au point permettra de repousser à des fréquences plus élevées la barrière entre l'électronique numérique et analogique et donc de simplifier grandement l'électronique associée aux systèmes de télécommunications hauts débits. Cette approche nécessitera des études de radio logiciel afin d'optimiser la numérisation des signaux. Enfin dans le domaine des sources de puissances à moyenne fréquence, la filière GaN est une solution largement étudiée qui permettra peut-être, à long terme, de proposer des sources semi-conducteurs de très fortes puissances.

Les circuits destinés au traitement du signal, à l'amplification, au mélange, sont également en forte progression compte tenu du fonctionnement multistandards des équipements de télécommunications. Le point clé est la conception de dispositifs reconfigurables, en particulier au niveau des circuits amplificateurs pour une programmation temps réel de la puissance et des bandes de fréquence aux différents standards. L'objectif prioritaire est de conserver le rendement et la linéarité sur toute la dynamique en puissance des signaux (de la saturation au back-off) et également sur de larges bandes de fréquence afin de permettre des transmissions haut débit adaptables aux protocoles évolutifs des systèmes. De hauts rendements permettront également une gestion thermique plus souple et surtout conduiront à de faibles consommations des équipements. L'amélioration de la linéarité est aussi un moyen de conserver l'intégrité du signal et donc de simplifier les chaînes de communications en diminuant le coût et la complexité des systèmes de correction.

- Au niveau international, de nombreux laboratoires universitaires et industriels aux Etats Unis, soutenus par l'agence DARPA,

développent des activités de recherche sur les composants et circuits actifs. L'Université d'Illinois travaille sur les composants InP pour la synthèse digitale de circuits à hautes fréquences destinés à des systèmes de transmetteurs. Les Universités de Georgia-Tech et de Californie à San Diego ont axé une grande part de leur recherche sur la flexibilité en puissance des circuits amplificateurs et sur la génération de signaux submillimétriques à l'aide de composants SiGe. Ces travaux sont menés en collaboration avec les laboratoires industriels de IBM, Texas, INTEL, etc.

Sur les composants de puissance GaN, la tendance vise des puissances très élevées (400W) pour des applications dans les stations de base. Ces travaux sont essentiellement réalisés par les laboratoires industriels de NEC, EUDYNA au Japon et Freescale aux États-Unis, associés aux Universités de Californie.

Au niveau national, ces activités de recherche sont centrées autour de grands groupes industriels auxquels sont associés des laboratoires CNRS. Pour le matériau InP, la société Alcatel Thalès III-V Lab est un leader dans le domaine avec une collaboration efficace des laboratoires CNRS. Les laboratoires de Philips, STMicroelectronics et du CEA ont une forte activité sur le matériau SiGe, associée aux laboratoires du CNRS pour les études de caractérisation et de conception : IXL/IMS, IEMN (laboratoires communs avec STM), IEF, LAAS, XLIM. Enfin sur les composants GaN, l'essentiel des activités de développement technologique est centré autour de Thalès via les laboratoires communs avec l'IEMN, IXL/IMS et XLIM.

2.2 COMPOSANTS ET CIRCUITS PASSIFS

Dans le domaine des composants passifs, les principaux challenges sont la recherche de nouvelles solutions technologiques, basées notamment sur l'utilisation de nouveaux matériaux agiles en fréquence, sur l'utilisation de méta matériaux, et sur de nouvelles approches

de conception pour construire une fonctionnalité spécifique. Un des enjeux majeurs vise à la miniaturisation des dispositifs afin d'offrir un niveau d'intégration maximum tout en conservant l'intégralité des performances.

De nombreux travaux portent sur les matériaux à faible et à forte permittivités pour la réalisation d'éléments localisés de type capacité ou self 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 ou de commutateurs à actionnement électrostatique. Actuellement les objectifs visent à abaisser les tensions de commande, afin de 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.

Dans le domaine des résonateurs, on assiste également à un fort développement des nouvelles technologies dans un souci de miniaturisation et d'intégration dans des technologies grand public à fort rendement et donc bas coûts. La technologie BAW (Bulk Acoustic Waves) est un exemple représentatif puisque, destinée entre autre à la téléphonie mobile, elle représente un challenge important pour le secteur économique. Si actuellement des procédés technologiques matures permettent la commercialisation de composants, il reste néanmoins des verrous technologiques à lever pour permettre une montée en fréquence de ces dispositifs et également un travail de conception afin d'optimiser leur utilisation. Sur les éléments résonants, la technologie de résonateurs à nano-gaps est également un

domaine en plein essor dans la recherche 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 ou matériaux artificiels sont une solution originale pour la réalisation de composants radiofréquences performants (antennes multifréquences, etc.). 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.

Deux types de circuits, conçus à partir des composants passifs élémentaires, constituent l'essentiel des chaînes de télécommunications : les dispositifs de filtrage de signaux et les éléments rayonnants. Dans les deux cas, les premiers objectifs de recherche sur ces deux familles de circuits concernent la miniaturisation des dispositifs, afin de prévoir leur utilisation dans les systèmes embarqués et leur intégration au plus près des circuits afin de faciliter leur connexion aux autres éléments. La tendance vise essentiellement à l'intégration hétérogène complète de ces composants passifs avec les circuits actifs dans une approche de type SIP (System In Package).

En termes de performance électrique, 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, etc.). Ces composants devront également intégrer des fonctions intelligentes qui permettront par exemple de router l'information avec une gestion optimale de l'énergie.

Cela est également vrai dans le domaine du filtrage où des solutions semblables, forte-

ment intégrables, doivent être développées dans un souci de reconfigurabilité en temps réel.

Forces et faiblesses

Dans le domaine des composants et circuits, les laboratoires CNRS impliqués se regroupent naturellement autour des laboratoires industriels ou publics afin de créer des consortiums cohérents et permettant un accès aux plates-formes technologiques nécessaires et indispensables. Dans cette communauté ces actions sont courantes et fonctionnent relativement bien. Cela conduit à une forte participation de ces laboratoires aux programmes nationaux (ANR, RNRT, RMNT, etc.), aux actions initiées par les organismes publics (DGA, CEA, CNES, INRIA, etc.) et à la création de nombreux laboratoires communs avec les industriels. À un degré moindre ces collaborations permettent aux laboratoires de participer à des projets européens.

Cependant, peut être en raison d'une orientation des axes de recherche très marquée dans le domaine des télécommunications, les ouvertures vers d'autres domaines scientifiques sont encore trop ponctuelles, marginales et mal préparées par les laboratoires et les organismes de rattachement. Dans certaines Universités des Etats-Unis de fortes collaborations existent par exemple entre les domaines de l'électronique et de la biologie sous forme institutionnelle. Il en est de même avec d'autres secteurs comme l'informatique ou les mathématiques. En France, seul le domaine de procédés d'élaboration des matériaux a établi de fortes collaborations avec la communauté des composants mais toujours avec des perspectives fortement orientées télécommunications. Ces ouvertures ne seront possibles que si elles sont fortement initiées par les organismes de rattachement avec la création de projets transversaux, sous forme de plate-forme ou de programme de recherche, soutenus par des moyens financiers et humains. Une synergie entre les sections 07 et 08 sur les travaux à l'interface logiciel-matériel est particulièrement souhaitable.

2.3 PERSPECTIVES STRATÉGIQUES

Dans le domaine des composants et circuits, les laboratoires CNRS impliqués se regroupent naturellement autour des laboratoires industriels ou publics afin de créer des consortiums cohérents et permettant un accès aux plates-formes technologiques nécessaires et indispensables. Dans cette communauté ces actions sont courantes et fonctionnent relativement bien. Cela conduit à une forte participation de ces laboratoires aux programmes nationaux (ANR, RNRT, RMNT, etc.), aux actions initiées par les organismes publics (DGA, CEA, CNES, INRIA, etc.) et à la création de nombreux laboratoires communs avec les industriels. À un degré moindre ces collaborations permettent aux laboratoires de participer à des projets européens.

Dans ces secteurs fortement orientés télécoms, les enjeux concernent essentiellement quatre points.

1. La montée en fréquence des dispositifs pour diverses raisons :

- permettre l'augmentation du débit de transmission dans les systèmes de télécommunications en offrant de plus larges bandes passantes et en repoussant les limites de l'utilisation des circuits numériques notamment les CAN,

- disposer de signaux hautes fréquences (THz) nécessaires dans de nombreuses applications (biologie, métrologie, défense, etc.).

2. Accroître les niveaux de puissance des sources à l'état solide afin de proposer des dispositifs à encombrement et volume réduits dans les systèmes embarqués.

3. La miniaturisation, le packaging, l'interconnexion 3D, l'intégration hétérogène, et l'intégration des modules de traitement et de la commande des dispositifs. Ces assemblages 3D génèrent des problèmes liés aux contraintes thermiques, mécaniques, hyperfréquences qu'il faudra traiter tout en conservant la compatibilité avec les technologies grand public et donc bas coût.

4. La reconfigurabilité vers l'intelligence des circuits pour répondre aux besoins des nouveaux systèmes de communication participant à une intelligence ambiante.

Ces efforts sur les composants et dispositifs, actifs ou passifs, ne seront réalistes qu'avec des outils d'aide à la conception qui doivent couvrir des domaines très vastes puisque interviennent la physique des composants, l'électromagnétisme des composants, des circuits, des antennes et des interconnexions, la thermique, la théorie des circuits et des fonctions non linéaires. Les enjeux concernant ces logiciels portent principalement sur deux domaines :

Les analyses multi-échelles et multi-physiques nécessaires à la caractérisation du comportement des composants et des dispositifs dans un environnement complexe lié par exemple à des milieux très hétérogènes, aux fortes densités d'intégration ou encore aux perturbations électromagnétiques. Elles permettront de prendre en compte l'évolution des architectures des circuits qui deviendront des systèmes sur puce SOC (System On Chip) dont la fonctionnalité sera implantée dans des circuits entièrement configurables.

Le développement d'outils d'optimisation rigoureux pouvant être spécifiques aux différents domaines de la physique ou multidisciplinaires.

Cependant, peut être en raison d'une orientation des axes de recherche très marquée dans le domaine des télécommunications, les ouvertures vers d'autres domaines scientifiques sont encore trop ponctuelles, marginales et mal préparées par les laboratoires et les organismes de rattachement. Dans certaines Universités des Etats-Unis de fortes collaborations existent par exemple entre les domaines de l'électronique et de la biologie sous forme institutionnelle. Il en est de même avec d'autres secteurs comme l'informatique ou les mathématiques. En France, seul le domaine de procédés d'élaboration des matériaux a établi de fortes collaborations avec la communauté des composants mais toujours avec des perspectives fortement orientées télécommunications. Ces ouvertures ne seront possibles que si

elles sont fortement initiées par les organismes de rattachement avec la création de projets transversaux, sous forme de plate-forme ou de programme de recherche, soutenus par des moyens financiers et humains. Une synergie entre les sections 07 et 08 sur les travaux à l'interface logiciel-matériel est particulièrement souhaitable.

3 – SYSTÈMES INTÉGRÉS (SI) ET ARCHITECTURES DE RÉSEAUX POUR LA COMMUNICATION (ARC)

Les systèmes intégrés et les architectures de réseaux pour la communication constituent d'évidence, des domaines étroitement liés, et ceci va s'accroître à l'avenir du fait de l'augmentation de la densité d'intégration associée aux technologies silicium les plus avancées. De ce fait, de nombreux verrous se font jour.

En ce qui concerne les systèmes intégrés, l'évolution technologique permet aujourd'hui de s'orienter vers l'intégration de systèmes complets qu'il s'agisse d'une intégration monolithique (*System on Chip* – SoC) ou d'une intégration multi-puces au niveau de l'assemblage (*System in Package* – SiP). Dans le cas d'un SoC, intégrer un système complet signifie faire coexister sur un substrat unique des composants, certes homogènes (transistors MOS), mais dont le nombre atteint un milliard avec les technologies CMOS nanométriques. Dans le cas d'un SiP, intégrer un système complet signifie faire coexister dans un assemblage unique des puces et des composants hétérogènes pouvant être issus de nœuds technologiques différents mais aussi de technologies différentes (CMOS Silicium, GaAs, SiGe, etc.). À ce niveau d'intégration, les processus technologiques ne peuvent plus maintenir un rapport constant entre les variations technologiques et les valeurs nominales des paramètres des composants. Il faut considérer les fluctuations des

paramètres des circuits intégrés générés par les impuretés contenues dans les fluides et les gaz mis en œuvre lors des différentes étapes technologiques. Il s'ensuit un changement fondamental dans les méthodologies de conception qui devront bâtir des systèmes en associant non plus des composants idéaux mais des composants avec un fonctionnement « éloigné » du nominal voire « dégradé ». Des formes nouvelles de conception robuste, voire tolérante aux fautes, sont à inventer. Un effort de modélisation important est alors nécessaire pour représenter finement le comportement électrique des transistors nanométriques mais aussi l'ensemble des phénomènes parasites affectant le fonctionnement du circuit principalement au niveau des interconnexions, des technologies d'encapsulation et des couplages avec le substrat. En effet, la diminution des tailles des transistors se conjugue à une augmentation des fréquences de fonctionnement affectant l'intégrité du signal. Par exemple, le synchronisme des horloges ne peut plus être garanti à travers le circuit complet conduisant à de nouveaux concepts du type « circuit globalement asynchrone – localement synchrone ». Dans le même esprit, des axes prometteurs sont à l'étude pour les circuits digitaux asynchrones. Compte tenu des nombreuses applications où l'autonomie est un facteur critique, la consommation de ces systèmes devra être modélisée, gérée et maîtrisée. Notons que le courant consommé peut aussi devenir un point extrêmement critique pour les circuits sécurisés, qui sont le siège de courants de fuite statiques et dynamiques. Un défi important réside aussi dans l'intégration de fonctions analogiques et/ou RF, de MEMS ou NEMS associant des technologies hétérogènes (fonctions optiques, chimiques, mécaniques, biologiques, etc.). Les interactions croisées analogique-digital sont aujourd'hui mal modélisées. Pour tous ces systèmes, les méthodologies de test anciennement basées sur des modèles de fautes simples sont à redéfinir de manière profonde, pour d'une part assurer la prise en compte des mécanismes nouveaux de dysfonctionnement et d'autre part des variations technologiques sachant que le circuit présente un degré variable de robustesse. Des stratégies de test,

au plus près des performances et des défauts réels, doivent être définies. Elles sont à rapprocher de nouvelles stratégies de conception mettant en jeu des architectures redondantes et reconfigurables, voire même auto-réparables, afin de les rendre tolérantes aux fautes

Pour les technologies les plus avancées – nœuds 32 et 25 nm –, une forte sensibilité aux événements singuliers est constatée. Une nouvelle classe de défauts non catastrophiques est à analyser, du type des claquages « soft » dans les oxydes minces de grille. Les méthodes de vieillissement accéléré ne s'appliquent plus à ces technologies : en effet les très faibles tensions de fonctionnement les rendent inopérantes car elles nécessiteraient des temps de test irréalistes.

Les interactions logiciel/matériel demandent de nouvelles compétences à la marge des thèmes relevant des sections 07 et 08 du Comité National. En particulier, la fiabilité des logiciels embarqués est à évaluer et à assurer. Ceci représente un défi critique pour la production des SoC.

En ce qui concerne les Architectures de Réseaux pour la Communication, dans les années à venir, le développement de réseaux de communication à bas ou moyen débit fonctionnant sans station de base (réseaux *ad hoc*), à l'image des réseaux de capteurs, va introduire une nécessité montée en fréquence liée à l'encombrement du spectre et à la réduction des éléments rayonnants, et au déport de tout ou partie de la gestion des réseaux dans les systèmes intégrés pour permettre à un nœud d'assurer la fonction de passerelle entre deux sous-réseaux – et ceci en plus de sa fonction propre.

4 – GÉNIE ÉLECTRIQUE

4.1 LA COMMUNAUTÉ DU GÉNIE ÉLECTRIQUE EN FRANCE

La communauté de recherche publique du secteur représente près de 1 200 personnes,

dont environ 500 chercheurs et enseignants chercheurs, 150 personnels administratifs et techniques, ainsi que 500 doctorants ou post-doctorants. Elle est constituée de 18 laboratoires publics : 7 sont associés au CNRS (Ampère, G2ELabs, GREEN, LAPLACE, LGEP, SATIE), 3 UMR aux contours scientifiques plus larges ayant uniquement une petite partie de leur activité dans le domaine du Génie Électrique (IES, LAAS, IXL/IMS). La communauté est rassemblée dans le groupement de recherche SEEDS (Systèmes d'Énergie Électrique dans leurs Dimensions Sociétales), qui exprime la volonté des laboratoires de développer ensemble des recherches vers des objectifs à fort enjeu sociétal.

Les principales thématiques abordées aujourd'hui par les laboratoires concernent :

- les matériaux (diélectriques, semi-conducteurs, supraconducteurs, magnétiques, etc.) ;
- les décharges électriques et les plasmas associés ;
- les machines et les actionneurs, de dimensions macroscopiques ou microscopiques (microsystèmes) ;
- les sources d'énergie ainsi que les moyens de stockage, tant à l'échelle macroscopique qu'à l'échelle des microtechnologies ;
- l'électronique de puissance (composants et convertisseurs) et son intégration ;
- les réseaux électriques (réseaux de transport, réseaux de distribution, réseaux de bord) ;
- les systèmes d'énergie électrique embarqués ;
- le contrôle et la commande des dispositifs pour la transformation ou la gestion de l'énergie ;
- les méthodes et outils de modélisation des phénomènes électromagnétiques, qui prennent un large aspect multiphysique dès que l'on s'intéresse aux dispositifs complets ;
- les méthodes et outils de conception et d'optimisation des dispositifs et systèmes électriques ;

– la compatibilité électromagnétique, la fiabilité, le diagnostic des défauts, la sûreté de fonctionnement et la disponibilité des dispositifs et systèmes électriques.

4.2 FORCES ET FAIBLESSES DU GÉNIE ÉLECTRIQUE

L'ensemble des laboratoires mène une activité contractuelle forte avec les entreprises (contrats de recherche, laboratoires communs Recherche/Industrie, transfert de licences et de logiciels, brevets, etc.), et engendre chaque année la création de plusieurs jeunes entreprises. Cette activité s'appuie sur un secteur industriel français important qui, de la production d'électricité à la fabrication de matériels électriques, est au 4^e rang mondial. Avec plus de 300 000 personnes et un CA de l'ordre de 100 G-Euros, il est le 2^e exportateur français. Cette industrie reste cependant très traditionnelle, ne valorisant pas réellement le doctorat, si bien que les jeunes ingénieurs préfèrent souvent entrer directement dans les entreprises. Il faut noter également que si les liens universitaires sont forts avec le secteur industriel français, ils sont, par contre, faibles voire inexistantes avec l'étranger : la visibilité et l'attractivité internationales sont certainement un challenge important pour le futur.

Cette activité contractuelle, liée à un manque certain de soutien institutionnel, conduit à une marginalisation du domaine : peu d'appels d'offres spécifiques nationaux ou européens, peu de recrutements spécifiques, notamment au CNRS. Ainsi, la communauté GE du CNRS ne représente que 60 chercheurs, soit 17% du nombre de chercheurs CNRS de la section 08. Ce manque de moyens favorise peu les recherches en avance de phase des préoccupations industrielles, qui restent fréquemment à relativement court terme. Poumon de la recherche, et également moins soumises aux contraintes concurrentielles, elles sont pourtant la vraie source d'attractivité, en particulier vis-à-vis de l'étranger.

Ces faiblesses expliquent également que les recherches menées en Génie Électrique apparaissent comme la continuité de recherches existantes, alors que les grands défis auxquels il est confronté nécessitent plus qu'une simple amélioration de méthodes, de technologies ou de systèmes, mais bien des ruptures technologiques et scientifiques. Le stockage d'énergie électrique et l'intégration de puissance qui est une réelle révolution pour l'électronique de puissance classique en sont des exemples typiques, le peu de moyens engagés ne permettant d'avancer que trop doucement. Le Génie Électrique a cependant profondément évolué ces dernières années : la démarche généralement développée est de type « système » ; les recherches sont bâties sur un socle fort de sciences physiques et sont au centre d'activités et d'applications qui impliquent de nombreuses disciplines : automatique, électronique, informatique, matériaux, mathématiques appliquées, mécanique, physique, sciences de la vie, thermique, traitement du signal, etc. ce qui devrait, à l'avenir rendre cette discipline plus attractive.

4.3 LES ENJEUX DU GÉNIE ÉLECTRIQUE

Aujourd'hui, le Génie Électrique se décline du système à l'échelle d'un continent aux objets micro- voire nanométriques, du gigawatt au milliwatt. Les grands enjeux technologiques, économiques et sociétaux auxquels il se doit de répondre sont la mobilité et la disponibilité énergétique d'une part, la santé et l'environnement d'autre part, dans le cadre d'un développement durable. Les défis qu'il convient de relever permettront de faciliter les déplacements des êtres humains, leur donner accès à l'énergie électrique lorsqu'ils sont nomades, rendre celle-ci disponible et fiable partout et en toute circonstance, apporter des solutions pour l'investigation, les traitements médicaux et l'assistance de fonctions vitales, contribuer à réduire les impacts de l'activité humaine sur l'environnement par une

utilisation rationnelle de l'énergie ainsi que par l'amélioration des procédés de fabrication ou de traitement, la dépollution et la mise en œuvre de capteurs d'environnement. Ces recherches nécessitent des approches nouvelles et très largement pluridisciplinaires, en rupture avec l'existant. Elles s'articulent autour des axes majeurs suivants, qui sont largement imbriqués :

- les matériaux multifonctionnels à hautes performances. Les matériaux utilisés dans le domaine du Génie Electrique (diélectriques, magnétiques, supra-conducteurs, actifs) subissent aujourd'hui de nouvelles contraintes extrêmement fortes, dues en particulier à l'utilisation grandissante de l'électronique de puissance et à la recherche de l'exploitation des systèmes aux limites de leurs possibilités. Dans ce contexte, les recherches concernent la caractérisation des matériaux dans leurs conditions d'utilisation, la modélisation de leur comportement et de leur vieillissement, mais aussi et surtout le développement de nouveaux matériaux pour l'écoconception ou permettant de fortes densités d'énergie de stockage et d'énergie de dissipation ;

- l'intégration de puissance : elle est essentielle pour une nouvelle génération de systèmes de conversion d'énergie, dont les performances seront incomparables en termes de rendement, compacité, fiabilité, disponibilité. Il faut noter qu'elle n'est pas limitée aux systèmes nomades de faible puissance, puisque ces solutions sont également mises en œuvre dans des prototypes d'onduleurs de puissance de plusieurs centaines de kW dans des systèmes embarqués. La prise en compte du système global doit être considérée dès la conception des composants à semi-conducteurs. Il en va de même pour le développement de nouvelles fonctions intégrées. La dimension énergétique, et par nature hybride, des systèmes de puissance rend la problématique complexe et fait que cette orientation doit s'accompagner de nombreux travaux amonts complémentaires : l'établissement d'une roadmap partant de la synthèse de nouveaux matériaux et allant jusqu'aux systèmes, en passant par des méthodologies de conception adaptées, par la prise en compte des pro-

cedés, de la thermique et de la CEM, et par de nouvelles architectures de conversion, offrira la possibilité de travailler en amont de la demande sociétale ou industrielle ;

- la production d'énergie de proximité et la production d'énergie à partir de sources d'énergie renouvelable décentralisées : micro-sources, piles à combustibles, panneaux photovoltaïques, éoliennes, hydrauliques, co-génération. Les principaux problèmes à résoudre sont la génération elle-même, les adaptations internes, le contrôle, le stockage de l'énergie, la gestion globale et rationnelle permettant une optimisation des rendements, ainsi que l'interfaçage avec les réseaux électriques. Concernant le stockage, peu d'avancées rapides sont prévisibles, et on cherche d'abord à améliorer les techniques existantes (électrochimique, inertiel, magnétique) ; on manque de modèles capables de prendre en compte les contraintes au sein du système global, les problèmes de vieillissement, le fonctionnement dynamique, le comportement en température ou l'état de charge ainsi que la détermination du rendement énergétique. Enfin, l'autonomie énergétique des systèmes nomades (optimisation de la consommation, stockage local) et le développement de systèmes de recharge innovants (télé-alimentation) sont également à développer ;

- l'optimisation de l'architecture et le contrôle des systèmes électriques (du système embarqué au réseau de distribution d'énergie électrique), ainsi que leur sûreté de fonctionnement intrinsèque ou vis-à-vis de leur environnement en incluant la maîtrise des perturbations électromagnétiques. Cela passe en particulier par la synthèse de commandes adaptées (linéaires, non-linéaires, robustes), par le développement de techniques de diagnostic prédictif, par des stratégies de reconfiguration dynamique, par l'utilisation croissante du retour d'expérience, par la résolution des problèmes de modélisation des interactions et des systèmes complexes, et par le développement de nouveaux outils de prédiction des phénomènes CEM ;

- les applications à la santé et à l'environnement. Cela inclut la navigation dans le corps

humain, autant pour l'investigation que pour la délivrance de molécules, ainsi que l'assistance (voire la substitution) à des organes défaillants, en couplage étroit avec des systèmes de transmission et de traitement d'informations échangées entre les systèmes intra-corporels et les équipements externes. Cette problématique intègre la question du transfert et du stockage d'énergie à l'intérieur du corps, ainsi que les questions de production d'énergie d'origine humaine et des modes de transfert percutanés. D'autre part, la maîtrise des effets des champs électromagnétiques sur le vivant pour, suivant le contexte d'application, soit améliorer leurs apports, soit limiter leurs effets négatifs, est fondamentale. Enfin l'élaboration de capteurs pour mesurer par voie électrique des teneurs en espèces chimiques ou biologiques, et le développement de techniques électriques à des fins de dépollution, basées sur les plasmas thermiques, sur les plasmas froids, ou sur les champs électriques, sont essentiels vis-à-vis des enjeux environnementaux actuels et futurs ;

– le développement d'une approche globale de modélisation et de conception, s'appuyant sur des modèles physiques multiples (multi-physique : au-delà de l'électromagnétisme, la thermique, la mécanique des fluides, les transports de charges, etc.), avec des différences d'échelle dans les systèmes (multi-échelles), couplant différentes méthodes numériques ou analytiques (multi-méthodes). Cela s'appuie en particulier sur des méthodes performantes de réduction de modèle. Les problèmes liés à l'incertitude sur la valeur des paramètres, leur variabilité, ou aux fortes non-linéarités des phénomènes, doivent également être abordés.

4.4 PROPOSITION DE MOYENS D'ACTION

À travers SEEDS, la communauté de recherche en génie électrique s'est organisée de manière à pouvoir mener des actions coor-

données. De fait, elle devrait être de plus en plus concernée par les programmes de recherche nationaux ou internationaux portant sur certains domaines d'application, en raison de ses relations contractuelles. C'est déjà fortement le cas dans le transport quel qu'en soit le mode (terrestre, maritime ou aéronautique), dans celui de l'énergie (énergies renouvelables et réseaux électriques). C'est encore très (trop) diffus dans les domaines des technologies de l'information et de la communication, de la santé et, dans une moindre mesure, de l'environnement. Les secteurs industriels de ces domaines sont issus le plus souvent de champs disciplinaires éloignés du Génie Électrique, et ils n'ont pas encore identifié celui-ci comme un acteur majeur de l'innovation. La perception actuelle du potentiel du Génie Électrique par les différents acteurs est beaucoup trop faible pour le mettre au cœur des projets développés. C'est pourquoi un travail important de promotion est à réaliser, tant de la part de la communauté que de la part des institutions.

D'autre part, il est essentiel de travailler en amont de la demande sociétale ou industrielle. C'est pourquoi, sauf à risquer de voir disparaître la recherche publique en Génie Électrique, un effort significatif de soutien de la part des institutions est à faire au niveau national, en lançant et finançant des programmes de recherche spécifiques, en attribuant des moyens financiers ou humains, et en participant au développement des plates-formes techno-logiques.

5 – PHOTOVOLTAÏQUE

La conversion photovoltaïque présente les avantages d'une énergie propre qui nécessite des recherches sur les matériaux, l'augmentation des rendements au sein de composants bas coût et pour laquelle le problème réel d'un stockage efficace reste à résoudre. Celui-ci, qui est aussi une voie de

recherche importante, se situe un peu en marge du champ d'action de la section 08. Depuis le début des années 2000, le contexte a fortement changé avec l'arrivée de deux nouveaux acteurs importants, EDF et le CEA, ainsi que plus récemment, avec la création de l'ANR qui finance un programme « Solaire Photovoltaïque ».

Les études principales actuelles sont regroupées autour de trois filières et d'une action plus transversale concernant les nouveaux concepts pour les cellules dites de 3^e génération ou de très haut rendement. Les trois filières technologiques concernent le silicium (massif ou en couche mince), les chalcopyrites à base de CIS et les semi-conducteurs organiques :

– **filière silicium** : Les projets sont orientés vers la réduction des coûts de fabrication en jouant soit sur les procédés de réalisation du dispositif photovoltaïque, soit sur le procédé de fabrication du lingot de silicium ;

– **filière CIS** : Les cellules photovoltaïques en couches minces à base des matériaux chalcopyrites Cu, In, Ga, Se ou S présentent des rendements records de l'ordre de 20% pour de petites surfaces de quelques cm² et de 13% pour les modules.. Deux voies de recherche sont actuellement poursuivies : la première, visant une forte réduction du coût de fabrication de l'absorbeur en remplaçant les techniques d'élaboration sous vide par une technique électrochimique, s'appuie sur la plate-forme du site R&D d'EDF à Chatou et sur les collaborations avec les laboratoires du CNRS (IRDEP, IREM et LGEP) ; la deuxième voie s'attache à la maîtrise des matériaux grands gaps de cette famille à partir de la technique de co-évaporation ;

– **filière organique** : L'objectif actuel des recherches dans ce domaine est d'explorer un grand nombre de matériaux et de concepts pour en évaluer leur potentialité et de pouvoir faire à son issue des choix stratégiques en terme de filières à développer.

Les récentes évolutions des recherches sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, montrent qu'une nouvelle dynamique

s'est mise en place à l'échelon national. Les deux nouveaux acteurs importants EDF et CEA y ont contribué et se sont bien positionnés. En plus des laboratoires rattachés à la section 08, fortement impliqués depuis longtemps dans ces études (InESS, LAAS, LGET, LGEP, LPICM, LPM), cette nouvelle dynamique a entraîné le partenariat d'autres laboratoires de la section (CEM2, IMN, IXL, LPN). La communauté Génie Électrique devrait pouvoir à l'avenir être plus présente en apportant son expertise dans une approche système et gestion de l'énergie. On peut par ailleurs souligner la contribution plus importante de chimistes en particulier sur les matériaux à base de chalcopyrites et les matériaux organiques.

6 – MICRO ET NANOSYSTÈMES

6.1 PRÉSENTATION DU DOMAINE

Les micro et nanosystèmes s'imposent progressivement comme un champ très actif des micro et nanotechnologies. L'état de l'art aujourd'hui révèle quatre singularités :

– l'arrivée à maturité industrielle d'un nombre croissant de dispositifs (capteurs de pression, accélération, têtes d'impression, etc.), suscitant un fort besoin en termes de **fiabilité et de méthodes de conception génériques**, alors que d'autres systèmes nécessitent encore des études fondamentales ;

– une explosion de la demande. Tous les secteurs applicatifs sont concernés aujourd'hui : télécommunications, domotique, santé, etc. ;

– suscitée par cette demande de plus en plus variée, une évolution vers **des solutions très hétérogènes en termes de principes actifs, matériaux et technologies** ;

– une évolution irréversible, d'une part vers **des systèmes multifonctionnels et multi-**

disciplinaires, et d'autre part vers l'intégration d'éléments nanométriques.

La recherche est donc multiforme et puise toute sa richesse d'un côté dans la capacité à associer des éléments différents et complémentaires (intégration) et de l'autre dans l'offre technologique (matériaux-technologies-principes actifs) largement alimentée par l'ouverture aux autres domaines disciplinaires. Elle s'articule aujourd'hui autour de quelques axes majeurs :

L'architecture système et la conception

Si, pour parvenir à l'élaboration d'un microsystème, il est fondamental de maîtriser les matériaux et technologies associées on peut également considérer que le degré de maturité acquis par la recherche en France permet une approche globale pour leur conception. Les microsystèmes ont cependant encore beaucoup à apprendre des approches « top-down », telles que développées en microélectronique par exemple, qui considèrent le microsystème sous son aspect fonctionnel, en intégrant notamment dès le départ dans la conception les problèmes de détection, de commande, de communication, de test, de fabrication en nombre et d'encapsulation. Encore balbutiante, cette vision se construit cependant progressivement en intégrant les notions de modélisation multi-échelle, prototypage virtuel, fiabilité prédictive ou « design for manufacturing ». Bien accueillie en France par la communauté des technologues et des concepteurs, cette démarche bénéficie d'une bonne dynamique soutenue par des initiatives européennes (NoE IST-PATENT) ou nationales.

Les matériaux et procédés nouveaux et alternatifs

La communauté française de recherche en science des matériaux et en procédés est nombreuse, forte et transversale à plusieurs départements scientifiques du CNRS. Toutefois une fraction limitée s'intéresse aux problèmes

spécifiques des matériaux et procédés pour les MNS. Les travaux de recherche sur les matériaux utilisés dans les micro/nano systèmes nécessitent en effet d'être finalisés : il s'agit d'étudier les problèmes d'intégration de ces matériaux, à exploiter d'autres propriétés, à permettre de nouveaux principes d'actionnement, de détection, de communication ou de stockage/traitement de l'énergie, à améliorer les performances de dispositifs existants ou à ouvrir le champ d'application des micro/nano systèmes Cette recherche concerne aujourd'hui l'étude des potentialités de « nouveaux » substrats (souples, organiques, céramiques, verres, substrats hétérogènes, autres semi-conducteurs que Si, GaAs et InP, circuits imprimés avancés, fibres, matériaux vivants, etc.) et de la technologie de fabrication de dispositifs sur ces substrats, l'élaboration et l'intégration de « nouveaux » matériaux fonctionnels (passifs ou actifs) en couches minces (nouveaux matériaux piézoélectriques, magnétiques et piézo-résistifs, métaux super élastiques, matériaux magnétostrictifs, polymères actifs, matériaux biologiques, matériaux élasto-optiques et thermoélastiques, etc.), la fabrication et l'exploitation de « nouvelles » formes de matériaux (fibres, micro/nano fils, micro/nano tubes, micro/nano pointes, films ultraminces, matériaux poreux, matériaux composites intégrant des micro/nano particules, matériaux micro/nano structurés, etc.). La communauté système française s'ouvre progressivement à ces aspects fortement porteurs d'innovation. Toutefois, la teneur fortement technologique du travail n'est pas toujours perçue à sa juste valeur et incite peu à une implication forte.

Les fonctions nouvelles : communication, détections physique, biologique et chimique, microfluidique, etc.

Dans le domaine des communications, les voies explorées jusqu'à ce jour sont basées sur la conception et la fabrication de composants à base de structures mobiles mettant en avant soit des propriétés d'accordabilité (notion de reconfigurabilité) soit des proprié-

tés de génération et de détection de signal à très haute fréquence. Toutefois, ces dernières années, les notions de fiabilité et de packaging ont permis d'offrir des solutions intégrées incontournables. Depuis peu, grâce notamment aux développements des outils de nanofabrication de nouveaux composants multifonctions ont émergé, mettant en avant de nouvelles propriétés liées aux interactions électron/photon/phonon par exemple, des performances accrues telles l'exacerbation de la sensibilité (ps, fs), la diminution de la consommation (nanowatt), la génération de signaux à très hautes fréquences (THz), le très faible encombrement ($< \text{mm}^2$) ou haute sensibilité à l'actionnement, les effets quantiques (photon unique), etc.

Dans le domaine de la détection biologique et chimique, le besoin s'est sensiblement déplacé du problème de la sélectivité, verrou essentiel mais partiellement compensable et contournable par l'intégration de systèmes plus complexes (systèmes multicapteurs, micro-fluidiques), vers une demande en très grande sensibilité ou en composants intégrant des fonctions complémentaires. De nouvelles voies de développement s'ouvrent concernant les nouveaux modes de transduction : Tera-hertz, nanofils, nanotubes, nano-boîtes, nanoparticules, nano-adressage, etc., l'intégration de fonctions complémentaires d'auto-calibration et auto-test, de communication et d'autonomie énergétique, le développement de principes de détection et de technologies bas coût pour des capteurs biocompatibles, stérilisables, jetables ou réutilisables.

L'intégration microfluidique, conceptuellement plus récente, s'est imposée progressivement au cœur de la problématique micro-système. Les actionnements mécaniques par pompage, par membrane souple actionnée, PDMS ou autre, ont été largement étudiés. Pour bon nombre d'applications, ces solutions restent cependant lourdes à mettre en œuvre ou peu adaptées en termes de performances (débit, pression, dynamique, mais également coût et encombrement) et de nombreuses solutions nouvelles sont aujourd'hui explorées mettant à profit les caractéristiques et proprié-

tés des matériaux et systèmes à petite échelle. Les progrès réalisés dans l'ingénierie des surfaces (fonctionnalisation chimique, micro et nanostructuration, etc.) renforcent progressivement les tendances déjà identifiées à utiliser des hétérogénéités portées par les fluides : particules, gouttes, bulles, etc. et, d'autre part, suscitent l'exploration des fonctions activables, de façon dynamique ou non, par les mécanismes de surface : transitions hydrophile/hydrophobe, modification de potentiels, variation locale de viscosité, etc. L'utilisation contrôlée de phénomènes couplés (thermique + électrique, thermique + magnétique, fluidique + électrique, etc.) constitue également un apport essentiel à l'évolution des microsystèmes fluidiques vers des dispositifs de plus haute fonctionnalité et de plus forte valeur ajoutée.

Très présente sur les aspects composants, la communauté française a accumulé une excellente compétence dans le domaine, la positionnant à niveau international. En témoigne sa bonne représentation dans les projets européens. Son manque d'agressivité en termes de communication ne lui permet pas, cependant, d'avoir la visibilité qu'elle mérite.

L'autonomie énergétique des micro et nanosystèmes

Une spécificité essentielle de l'énergie à l'échelle microscopique réside en l'aspect disséminé du besoin énergétique. Cette dissémination est liée à la forte augmentation de l'utilisation des systèmes autonomes, portables (téléphones, ordinateurs, robots, micro-drones, etc.), et, bientôt à la généralisation dans notre environnement de microsystèmes, micro-capteurs, micro-actionneurs. De nombreuses voies sont évaluées aujourd'hui. Ne seront évoquées ici que les principales. Le développement des batteries (piles) est un axe de recherche important mais ne relève pas, aujourd'hui, des MEMS mais plus de la chimie. Cependant l'utilisation de procédés planaires et collectifs (supports souples et

fins, ou procédés compatibles d'une intégration sur silicium) et la récupération/mise en forme de cette énergie pour les MEMS encouragent les synergies. Les micro-piles à combustibles sont une solution potentiellement très intéressante mais également peu traitée au sein de la communauté CNRS. Les micro-machines thermiques restent une solution très complexe à intégrer. Des avancées significatives placent la France en bonne position tant sur les turbines que sur les micro-générateurs. Parmi les sources de faible puissance, la génération photovoltaïque soulève plus des problèmes d'ordre pratique (packaging) et industriel ou liés à la conversion et au stockage d'énergie de très faible niveau. La recherche sur la génération thermoélectrique est orientée fondamentalement sur les matériaux et leur intégration au sein des microtechnologies. Enfin, la récupération d'énergie mécanique, (vibratoire, circulation d'un fluide, déformation, compression, etc.) est un thème de recherche en plein développement mais le domaine à explorer est vaste en termes de sources ou de principes de récupération (électrostatique, magnétique, piézo-électrique, magnétostrictif, etc.). Outre les aspects micro source, un point essentiel également concerne le problème de la conversion de l'énergie au plus près du micro-système. Seuls quelques laboratoires MNS CNRS abordent la thématique énergétique aujourd'hui, ces études étant menées pour l'essentiel au sein du CEA.

L'assemblage et le packaging

Le développement de procédés pour la fabrication ou l'encapsulation des micro/nano systèmes est actuellement très largement fondé sur des équipements de dépôt, de lithographie et de gravure relativement standards (le plus souvent industriels). En d'autres termes, la place dédiée au développement de nouvelles techniques dans les équipes de recherche de la communauté des micro/nano systèmes est assez limitée, sans doute en raison de l'investissement lourd en moyens et en temps nécessaire. Cela n'empêche pas de très nombreuses et réelles innovations technologiques en termes de

procédés. Mais le passé a démontré que l'avènement de nouvelles techniques comme la gravure ionique réactive profonde, la soudure de substrats ou la nano-impression ont largement contribué/révolutionné la technologie des micro/nano systèmes. Encore aujourd'hui des techniques récentes comme l'impression à jet d'encre, la micro électrodécharge ou le microsablage ouvrent de nouvelles possibilités technologiques inédites et intéressantes.

Considérée à tort comme faiblement porteuse scientifiquement, cette thématique est peu présente dans les laboratoires. Quelques laboratoires ont su cependant ouvrir des approches pertinentes en réponse notamment au très fort besoin suscité par l'hétérogénéité matérielle et fonctionnelle grandissante des MNS.

Le test et la fiabilité

La fiabilité est le premier frein à l'industrialisation des MNEMS. Les problèmes à résoudre sont assez bien identifiés mais ils sont nombreux et restent en grande partie à résoudre : diversité des matériaux et connaissance insuffisante de leurs propriétés, diversité des procédés de fabrication et des principes d'actionnement/détection utilisés, effets de l'encapsulation, des étapes de « back end » et de l'environnement, manque de méthodes reconnues pour la caractérisation et le test de la fiabilité. Le challenge des années à venir concerne la fiabilité prédictive qui est actuellement balbutiante.

6.2 FORCES ET FAIBLESSES

Le CNRS dispose de toutes les compétences pour aborder la thématique MNS et il le fait très bien, depuis un certain nombre d'années au niveau des composants de base, plus récemment au niveau de l'intégration multifonctionnelle (conception et technologie). Toutes les grandes centrales technologiques françaises sont impliquées de façon significa-

tive dans la thématique. La communauté est majoritairement constituée de chercheurs jeunes et dynamiques formant des docteurs qui trouvent des emplois tant dans le secteur public que privé et aussi bien en France qu'à l'étranger. Cela est notamment vrai pour les doctorants formés aux microtechnologies mais aussi pour les quelques doctorants ayant abordés les MNS sous l'angle du système. La communauté scientifique des MNS est récente et s'est toujours trouvée aux carrefours permettant la communication entre les laboratoires : INTERLAB, RTB et maintenant RENATECH au côté duquel agira le GDR MNS. On peut noter aussi une très bonne représentation des laboratoires français dans les programmes européens liés aux MNS. Enfin, la communauté des MNS s'étend de jour en jour et a su parfaitement accompagner voire anticiper les ouvertures vers les autres domaines pluridisciplinaires. Cela s'accompagne par une interaction importante avec le tissu industriel, grandes entreprises mais également, et ceci constitue certainement une particularité des MNS, PME et PMI innovantes.

Le domaine des MNS a profondément changé au cours des cinq dernières années. D'une communauté unique, il a évolué vers autant de communautés scientifiques qu'il y a de domaines d'application. Cet éparpillement de la communauté a résulté en un manque de communication et de coordination préjudiciable à l'efficacité globale mais également à la visibilité de la thématique. Un même manque d'interaction se retrouve à l'échelle des grands organismes que sont le CNRS et le CEA. L'émergence des nanotechnologies, vue au départ comme une ouverture pour les MEMS, s'est révélée être un écran masquant l'activité de la communauté qui peine aujourd'hui à être reconnue et financée alors qu'elle joue un rôle très important à l'interface entre le monde macroscopique et celui des nanotechnologies et à l'interface des disciplines.

Une dernière faiblesse se situe dans la nécessaire implication scientifique des chercheurs dans plusieurs disciplines ce qui est difficile pour un jeune chercheur et augmente ainsi la difficulté de recrutement de CR2.

Notes

(1) ENIAC, European Nanoelectronics Initiative Advisory Council, ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/eniac/strategic_research_agenda_full.pdf

**Répartition par thématiques scientifiques et par laboratoires rattachés à la section 08
des chercheurs CNRS et enseignants-chercheurs (comptés à 50 %).**

Code	Unité	Localité	Nano-technologies	Nano-électronique	Photonique / Nanophotonique	Nano-magnétisme	Électromagnétisme	Composants RF	Circuits et systèmes RF	μ et nano-systèmes	Énergie électrique	Total
FRE 2448	LUSSE	Tours								7,5		7,5
FRE 2848	Inst, Delaunay	Troyes			7,5							7,5
UMR 137	UMP	Palaiseau				2,0						2,0
UMR 5005	Ampère	Lyon					5,0				17,0	22,0
UMR 5129	LTM	Grenoble	6,0	12,0								18,0
UMR 5130	IMEP	Grenoble	2,0	15,0	9,0	1,0	2,0	3,5	11,0	3,5	0,0	47,0
UMR 5214	IES	Montpellier	4,0	23,0	19,0				7,0	13,0	13,0	79,0
UMR 5218	IMS	Bordeaux	3,5				1,5	18,0	23,0	12,0	5,5	63,5
UMR 5269	G2ELab	Grenoble					11,0			6,0	30,0	47,0
UMR 5270	INL	Lyon	11,0	8,5	11,0				1,5	6,0	0,0	38,0
UMR 5506	LIRMM	Montpellier		10,5								10,5
UMR 5516	LTSI	Saint-Étienne	7,0		10,0		7,0					24,0
UMR 6071	LEAT	Nice					3,5		3,5			7,0
UMR 6082	FOTON	Lannion	7,0		3,5							10,5
UMR 6133	Inst, Fresnel	Marseille			30,0		3,0					33,0
UMR 6137	L2MP	Marseille		20,5	1,0							21,5
UMR 6162	ARTEMIS	Nice			2,0							2,0
UMR 6164	IETR	Rennes		7,5			9,5		10,5			27,5
UMR 6165	LEST	Brest					8,0	10,0	10,0	5,0		33,0
UMR 6172	XLIM	Limoges			9,0		7,0	10,0	14,0			40,0
UMR 6174	FEMTO-ST	Besançon	3,0	3,0	16,5		1,5		8,5	16,0		48,5
UMR 6602	LASMEA	Clermont-Ferrand			13,0	1,0	10,0			5,0		29,0

Code	Unité	Localité	Nano-technologies	Nano-électronique	Photonique / Nano-photonique	Nano-magnétisme	Électromagnétisme	Composants RF	Circuits et systèmes RF	μ et nano-systèmes	Énergie électrique	Total
UMR 6622	LPMC	Nice			10,5							10,5
UMR 7037	GREEN	Nancy									10,5	10,5
UMR 7163	InESS	Strasbourg	4,0	4,0						10,0	5,0	23,0
UMR 7647	LPICM	Palaiseau		5,0								5,0
UMR 8029	SATIE	Cachan			0,5	2,0	2,0			2,0	8,0	14,5
UMR 8501	LCFIO	Orsay			18,5		2,5			1,0		22,0
UMR 8507	LGEP	Gif-sur-Yvette	2,0	7,0			4,0	2,0		2,0	6,0	23,0
UMR 8520	IEMN	Lille	10,0	15,0	5,0	2,0	5,0	10,0	20,0	15,0	0,0	82,0
UMR 8622	IEF	Orsay	6,0	13,0	14,0	13,0	4,0	3,0	6,0	9,0	0,0	68,0
UMR 5213	Laplace	Toulouse									37,0	37,0
UPR 20	LPN	Marcoussis			14,0							14,0
UPR 2940	Inst, Néel	Grenoble	2,0		4,0	3,0						9,0
UPR 8001	LAAS	Toulouse	3,0	2,5	3,0			4,0		36,5	3,0	52,0
URA 2512	SPINTEC	Grenoble				3,0						3,0
	Total		71	147	201	27	87	61	115	150	135	991,5

