

---

# RAPPORT DE CONJONCTURE

DU COMITÉ NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## ÉDITION 2014

---

Extrait



**CNRS ÉDITIONS**

15, rue Malebranche – 75005 Paris



## SECTION 08

---

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

*Extrait de la déclaration adoptée par le Comité national de la recherche scientifique réuni en session plénière extraordinaire le 11 juin 2014*

La recherche est indispensable au développement des connaissances, au dynamisme économique ainsi qu'à l'entretien de l'esprit critique et démocratique. La pérennité des emplois scientifiques est indispensable à la liberté et la fécondité de la recherche. Le Comité national de la recherche scientifique rassemble tous les personnels de la recherche publique (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens). Ses membres, réunis en session plénière extraordinaire, demandent de toute urgence un plan pluriannuel ambitieux pour l'emploi scientifique. Ils affirment que la réduction continue de l'emploi scientifique est le résultat de choix politiques et non une conséquence de la conjoncture économique.

### **L'emploi scientifique est l'investissement d'avenir par excellence**

Conserver en l'état le budget de l'enseignement supérieur et de la recherche revient à prolonger son déclin. Stabiliser les effectifs ne suffirait pas non plus à redynamiser la recherche : il faut envoyer un signe fort aux jeunes qui intègrent aujourd'hui l'enseignement supérieur en leur donnant les moyens et l'envie de faire de la recherche. On ne peut pas sacrifier les milliers de jeunes sans statut qui font la recherche d'aujourd'hui. Il faut de toute urgence résorber la précarité. Cela suppose la création, sur plusieurs années, de plusieurs milliers de postes supplémentaires dans le service public ainsi qu'une vraie politique d'incitation à l'emploi des docteurs dans le secteur privé, notamment industriel.

### **Composition de la section**

Christian BERGAUD (président de section); Maria TCHERNYCHEVA (secrétaire scientifique); Richard ARINERO; Aurélien BANCAUD; Didier BELOT; Maria PILAR BERNAL-ARTAJONA; Yann BOUCHER; Jumana BOUSSEY-SAID; Nicolas CLÉMENT; Raffaele COLOMBELLI; Gilles DAMBRINE; Philippe LEVEQUE; Yves MARÉCHAL; Bernard MULTON; Claude PELLET; Éric PLESKA; Anne-Lise SENTENAC; Éric TOURNIE.

## Résumé

Les domaines de recherche couverts par la section 08 sont multidisciplinaires et concernent l'électronique, la photonique, l'électromagnétisme et l'énergie électrique. Ils se déclinent selon un large spectre spatial et temporel en privilégiant une approche intégrative pour concevoir et développer de nouveaux composants et systèmes. Il s'agira dans certains cas de tirer profit d'une miniaturisation extrême afin d'accroître les performances d'un capteur, ou au contraire d'effectuer un passage d'échelle vers le monde macroscopique pour répondre aux exigences des réseaux d'énergie électrique par exemple. Ce rapport est structuré en cinq parties qui correspondent aux grands axes thématiques de la section 08 : micro-nanotechnologies, micro-nanosystèmes, photonique/ondes, électronique et énergie électrique.

---

## Introduction

---

Les domaines de recherche couverts par la section 08 sont multidisciplinaires et concernent l'électronique, la photonique, l'électromagnétisme et l'énergie électrique. Ils se déclinent selon un large spectre spatial et temporel en privilégiant une approche intégrative pour concevoir et développer de nouveaux composants et systèmes. Il s'agira dans certains cas de tirer profit d'une miniaturisation extrême afin d'accroître les performances d'un capteur, ou au contraire d'effectuer un passage d'échelle vers le monde macroscopique pour répondre aux exigences des réseaux d'énergie électrique par exemple. Les avancées les plus récentes, tant sur le plan technologique que conceptuel, s'appuient sur l'évolution des matériaux, le développement des micro-nanotechnologies et l'apport de nouvelles voies d'intégration 2D et 3D. Le domaine de l'instrumentation, de la caractérisation et de la modélisation est également en renouvellement constant. Il doit s'adapter à de nouvelles contraintes liées à la

réduction en taille et la complexification des micro-nanosystèmes. Enfin, pour faciliter le transfert technologique et la valorisation, de nombreux développements doivent en outre répondre aux besoins du monde socio-économique en prenant en compte tout particulièrement les contraintes liées au cycle de vie des composants et systèmes.

L'ensemble des activités de recherche développées au sein des laboratoires de la section 08 permet de répondre à des enjeux stratégiques dans des domaines au cœur de l'INSIS : l'environnement, l'énergie, la santé et les technologies de l'information et de la communication. Certains de ces enjeux sont abordés en interaction forte avec des laboratoires d'INS2I mais également sur un plan plus fondamental avec les laboratoires d'INP, d'INC et d'INSB.

Ce rapport est structuré en cinq parties qui correspondent aux grands axes thématiques de la section 08 : micro-nanotechnologies, micro-nanosystèmes, photonique/ondes, électronique et énergie électrique.

---

## I. Micro-Nanotechnologies

---

Les micro-nanotechnologies ont trait à la fabrication, la mesure et le contrôle de matériaux ou dispositifs à des échelles micro et nanométriques. Les recherches menées dans le périmètre de la section 08 sur ce thème peuvent se décliner selon trois axes : les nanomatériaux qui constituent la « matière première », la micro-nanofabrication qui permet la structuration de ces derniers, et la micro-nanocaractérisation qui rend possible leur étude.

### A. Nanomatériaux

Les nanomatériaux sont des matériaux dont la taille ou la structuration comporte au moins une dimension comprise entre 1 et 100 nano-

mètres environ. Cette taille nanométrique leur confère des propriétés physiques, chimiques ou biologiques particulières permettant d'envisager de très nombreuses applications en électronique (puits, fils et boîtes quantiques), en optique (modification des indices de réfraction, propriétés spectrales, etc.), dans le photovoltaïque (cellules de 5<sup>e</sup> génération) et dans bien d'autres domaines. Ces nanomatériaux peuvent être élaborés avec divers outils de nanofabrication, synthétisés par voie chimique ou d'origine naturelle (biologiques en particulier). Les nanomatériaux sous forme de cristaux atomiques 2D (graphène, MoS<sub>2</sub>, h-BN...) ont suscité récemment un intérêt majeur. Leurs propriétés uniques permettent d'envisager des applications dans des domaines aussi variés que l'électronique haute fréquence, l'optique, l'énergie et les capteurs. L'engouement pour cette thématique est tel que les propriétés de ces matériaux sont déjà bien maîtrisées. Des plans atomiques isolés peuvent être précisément réorganisés couche par couche en hétérostructures selon une séquence préalablement définie. Ces structures ouvrent de nouveaux horizons qui vont bien au-delà du simple «après graphène». Les matériaux 1D de type nanofils semi-conducteurs (silicium, III-V, avec et sans hétérostructures) ont également permis des avancées notables dans le domaine de l'électronique et de la photonique. Enfin, les matériaux 0D de type nanoparticules semi-conductrices (InSb, HgTe...), synthétisés chimiquement, permettent d'envisager de nombreuses applications en photonique tels que les photodétecteurs à bas coût à des longueurs d'ondes difficilement accessibles avec les technologies conventionnelles.

Outre la poursuite des recherches sur les semi-conducteurs traditionnels (les composants des processeurs utilisent des couches semi-conductrices de quelques nanomètres), il est recommandé d'explorer les potentialités de nouveaux matériaux (ferroélectriques, piézoélectriques, ferromagnétiques, matériaux à changement de phase, composés moléculaires...) et de leur intégration hétérogène sur des plate-formes (notamment silicium) multi-matériaux.

## B. Micro-Nanofabrication

Les approches conventionnelles descendantes «*top-down*» doivent relever le défi d'une miniaturisation incessante des dispositifs conjuguée avec l'avènement d'architectures complexes et hétérogènes. La lithographie optique à immersion est dorénavant utilisée à l'échelle industrielle mais, à l'aube des prochains nœuds technologiques (14 nm et au-delà), elle devra céder la place soit à la lithographie extrême UV utilisant un rayonnement X à 13,5 nm, soit à la lithographie électronique multifaisceaux. Cependant, ces deux méthodes de lithographie alternatives continuent à soulever quelques interrogations concernant leurs réelles capacités à s'introduire durablement et efficacement dans l'industrie de la microélectronique. L'utilisation éventuelle des copolymères di-blocs (CPB) pour l'écriture, sans masques, de motifs de résine de dimensions inférieures à 15 nm, est dorénavant une troisième option considérée avec intérêt par la communauté des nanosciences et nanotechnologies. Des programmes de recherches pluridisciplinaires, associant notamment les chimistes et les technologues, se focalisent sur l'évaluation du potentiel de cette technique en termes de défektivité et de compatibilité avec les procédés conventionnels. Les techniques de dépôt et de croissance de films ultraminces doivent également s'adapter aux nouvelles architectures 3D des transistors. Les dépôts à l'échelle atomique (*Atomic Layer Deposition*) et autres épitaxies à basse température doivent être optimisés pour améliorer les qualités structurales, interfaciales et électriques des films élaborés. Enfin, les procédés de gravure par plasma évoluent fortement afin de permettre le transfert de motifs nanométriques dans divers matériaux sous-jacents sans altérer leurs propriétés.

Les approches dites «*bottom-up*» progressent toujours en termes de reproductibilité et de capacité à être utilisées à l'échelle de substrats de grande surface. Une association vertueuse des techniques de nanostructuration des surfaces (manipulation de nanocolloïdes

métalliques, matrice de copolymères di-blocs ou d'alumine anodique porosifiée) avec les procédés de croissance localisée permet dorénavant de réaliser des nanofils semi-conducteurs homogènes et contrôlés et accroît significativement le potentiel de leur intégration dans des filières CMOS à faible budget thermique. Quant aux techniques d'auto-assemblage, on constate une grande diversification de leur mise en œuvre et la possibilité de décliner leur usage pour diverses applications en magnétisme, plasmonique et biologie.

Signalons enfin la généralisation des techniques de nanoimpression douce (*soft NIL*) sur la quasi-totalité des centrales technologiques du réseau Renatech où des procédés de réplication de micro- et nanostructures sur de grandes surfaces de substrats rigides (verre, silicium) ou flexibles sont développés et mis à profit pour différentes applications en photonique, nanofluidique ou magnétisme.

Le développement de l'ensemble de ces techniques de micro- et nanofabrication doit s'appuyer sur des outils de caractérisation et de métrologie dédiés.

## C. Micro-Nanocaractérisation

### Progrès des techniques à sonde locale

Les microscopies et spectroscopies à sonde locale jouent un rôle prépondérant dans les progrès réalisés en matière de micro-nanocaractérisation. Elles permettent de manipuler, mesurer et caractériser les matériaux et les composants nanométriques (propriétés électroniques, optiques, mécaniques, etc.). Leur développement est bien ancré au cœur de la section 08 et s'oriente notamment vers les mesures électriques à faible bruit et à très haute fréquence sur des dispositifs de haute impédance. Les autres tendances concernent l'imagerie ultra-rapide en milieu liquide et la haute résolution pour des applications en biologie. Les limitations à résoudre (temps d'acquisition trop longs, aberrations optiques...) conduisent à remplacer les sondes actuelles

par de nouveaux concepts (sondes circulaires à haute fréquence et haut facteur de qualité) ou à intégrer les transductions (sondes piézorésistives ou piézoélectriques).

Ces cinq dernières années ont donc vu le développement de procédés technologiques de fabrication de sondes MEMS AFM, dont les concepts ont été prouvés, et qui font maintenant l'objet de transferts technologiques par la création de «*start-up*» grâce à des collaborations avec les industriels du domaine de l'instrumentation. On peut citer en exemples le développement du *scanning microwave microscope* (SMM) (Agilent) mais aussi celui de la spectroscopie nano-Raman (Horiba Jobin-Yvon) qui ouvrent de nouvelles perspectives pour la caractérisation des couches minces.

### Les grandes plate-formes

De grandes plate-formes de micro-nanocaractérisation ont vu le jour, sous l'impulsion des initiatives d'excellence, dans le cadre des investissements d'avenir.

Un premier projet (ExCELSiOR) a permis de constituer un centre de mesures à dimension européenne dans le domaine des nanosciences, partagé entre communautés académiques et industrielles. Son ambition est de développer la future génération d'instruments et moyens expérimentaux dont bénéficiera une large communauté scientifique (physique, biologie...) et qui équiperont les centres industriels des secteurs de la nanoélectronique.

Les moyens sont mis à disposition grâce à deux plate-formes : l'une pour les microscopies à sonde locale, l'autre pour la caractérisation électrique (DC au THz et IR).

Un autre projet (IMPACT), en partenariat avec le CEA, a permis de mettre en place une plate-forme de nanocaractérisation quasi *in situ* (avec transfert sous vide des substrats, jusqu'à 300 mm de diamètre) dédiée aux études avancées des procédés technologiques et matériaux des futures générations de composants et circuits électroniques. Il comporte deux plate-formes : l'une pour les caractérisations optiques

(ellipsométrie, photoluminescence, Raman), l'autre pour la spectroscopie de photo-électrons. Enfin, une plate-forme (TEMPOS), en cours d'installation sur le plateau de Saclay, permettra d'analyser, *in situ*, par microscopie électronique en transmission à haute résolution, les mécanismes de croissance épitaxiale de films minces et autres nano-objets.

## D. Enjeux sociétaux, risques

Les micro-nanotechnologies ont une importance croissante en raison des retombées économiques attendues dans plusieurs secteurs industriels (électronique et communications, chimie, biologie, médecine et santé, etc.). Les pays développés orientent leurs investissements selon des feuilles de route et de prévision technologique. On voit ainsi se densifier les recherches pour les nanotechnologies alternatives au CMOS mais également dans un but de récupération d'énergie « propre ».

En matière de risques, des préoccupations réelles et légitimes existent pour la santé et l'environnement. Les risques à long terme pour les personnes impliquées dans la fabrication et l'utilisation de certains nanomatériaux sont en effet encore mal identifiés.

---

## II. Micro-Nanosystèmes

---

Il nous semble utile de préciser en préambule qu'une miniaturisation extrême d'un microsysteme ne constitue pas une fin en soi pour certaines applications comme c'est le cas pour l'électronique (si l'on fait exception de l'électronique de puissance). Il existe en effet des frontières dimensionnelles en deçà desquelles une réduction en taille peut être défavorable, il s'agit par exemple des microsystemes dont le principe de fonctionnement repose sur l'exploitation de phénomènes iner-

tiels, sur l'interaction avec des cellules ou des tissus biologiques. De nombreuses approches restent donc à explorer à des échelles micrométriques, voire millimétriques : technologies souples à base de nouveaux matériaux, co-intégration avec une électronique organique, nouvelles approches de mise en forme, de structuration, d'intégration, d'assemblage sur grandes surfaces, etc. Depuis quelques années, ces approches souffrent fortement de la vague « nano » ce qui tend à les sous-représenter dans le monde académique par rapport au monde industriel, au risque de pénaliser le fort potentiel d'innovation et de valorisation socio-économique des microsystemes.

Pour revenir à la dynamique de réduction d'échelle afin d'accroître les performances des micro-nanosystèmes, soulignons que la miniaturisation permet d'améliorer les réponses temporelles et les sensibilités de détection, mais qu'elle induit également une prépondérance des effets de surface et d'interface par rapport aux effets de volume : pertes énergétiques très hétérogènes, systèmes hors équilibre, cinétiques de réaction fortement altérées, variations stochastiques et non plus statistiques, instabilités, etc. Tous ces aspects doivent être pris en compte pour conduire à une exploitation fiable des dispositifs nanostructurés. Cela concerne en particulier le contrôle des dispersions technologiques des caractéristiques par l'optimisation des conditions d'élaboration et de mise en forme des matériaux sur une gamme d'échelle étendue, les traitements de surface et de passivation, l'encapsulation, etc. En outre, les notions de dynamique de mesure, de domaine de linéarité, de tolérance aux fautes, de redondance, de robustesse, de sensibilité et de résolution ultime doivent être revisitées.

Actuellement, les tendances fortes dans de nombreux domaines applicatifs ne concernent plus exclusivement la sensibilité mais plutôt la stabilité d'un système en environnement sévère, le temps de réponse, le volume d'analyse et éventuellement l'autonomie énergétique pour des systèmes portables ou implantables.

## A. Technologies de fabrication

La conception de micro-nanosystèmes (MEMS/NEMS) repose sur le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies de fabrication (cf. § I. Micro-Nanotechnologies). Les approches de conception descendante (*top-down*) issues de la micro-électronique sont à mettre en regard avec les approches de conception ascendante (*bottom-up*) plus récentes, héritées de la chimie et de la biologie. En particulier les nanobiotechnologies, domaine émergent associant les biotechnologies et les nanotechnologies, ou encore les systèmes biomimétiques ou matériaux bio-inspirés, changent fondamentalement la conception des micro-nanosystèmes en associant matières organique et inorganique. Des problématiques nouvelles, plus amont, concernent les architectures 2D et 3D, de nouvelles techniques de structuration, l'assemblage dirigé, l'intégration hiérarchique hétérogène et la conception de systèmes dont la durée de vie peut être en contrepartie limitée (système jetable).

Le couplage de ces deux approches, «*top-down*» et «*bottom-up*» (*template-assisted technologies*), s'avère particulièrement efficace pour optimiser les propriétés physiques, optiques, thermiques et électriques de micro-nanosystèmes afin qu'ils répondent à un cahier des charges très ciblé (impédance, absorbance, dissipation thermique, tension de claquage électrique, fatigue, vieillissement, perméabilité, biocompatibilité, etc.). Dans ce cadre, il apparaît essentiel de garantir au sein des plate-formes technologiques (RENATECH), une flexibilité d'utilisation imposée par le développement de technologies émergentes (technologies d'auto-assemblage inspirées de la chimie ou de la biologie, nouveaux matériaux organiques et inorganiques, polymères, biomatériaux, matériaux carbonés, nanoparticules, nanofils, etc.). De nombreuses techniques alternatives de dépôts doivent être exploitées pour des matériaux biocompatibles et «biosourcés»: dépôt électrochimique, impression 2D et 3D, *electrospray*, *electrospin-*

*ning*, technique pochoir (*stencil* ou *shadow mask*), *atomic layer deposition* (ALD), etc. Dans le domaine de l'encapsulation (*packaging*), l'intégration hétérogène 3D reste à optimiser avec éventuellement l'ajout de fonctionnalités lors de cette étape: antennes, capteurs pour le diagnostic *in situ* ou pour la récupération d'énergie (*smart packaging*).

Ici, des modélisations et simulations multi-physiques et multi-échelles deviennent incontournables. En outre, d'un point de vue conceptuel, des approches non intuitives exploitant notamment des configurations matérielles et/ou logicielles bio-inspirées restent à explorer.

## B. Caractérisation, test et fiabilité

Les développements récents des techniques de caractérisation et de test dédiées aux micro-nanosystèmes concernent les mesures effectuées en parallèle sans contact sur grandes surfaces (supérieures au  $\text{cm}^2$ ) avec des résolutions spatiales nanométriques et/ou des réponses temporelles inférieures à la nanoseconde. Ces mesures doivent dans certains cas être réalisées lors des différentes étapes d'un procédé de fabrication. La mise au point de bancs de tests sous atmosphère contrôlée ou en environnement sévère (température, pression, rayonnements, etc.) doit être renforcée pour appréhender les mécanismes de défaillance intrinsèque et extrinsèque, notamment après l'étape d'encapsulation. Le recours à des techniques de vieillissement accéléré peut s'avérer également très pertinent pour la fiabilité prédictive (qualification de dispositifs embarqués). Enfin, le développement de techniques de caractérisation à sondes locales permettant d'effectuer des mesures couplées (mécanique, optique, thermique, électrique, etc.) est en expansion, mais un cadre de standardisation est nécessaire pour l'avancée de ce domaine, notamment en ce qui concerne la calibration des mesures.



## C. Dispositifs

### 1. Actionneurs, capteurs et résonateurs mécaniques

L'intégration de matériaux fonctionnels (piézoélectrique, magnétique, électrostrictif, etc.) reste une voie à explorer pour développer des actionneurs à des échelles réduites en exploitant plus spécifiquement des comportements « contrainte-déformation » non-linéaires. Dans ce cadre, le développement de matériaux à changement de phase ou à transition de spin est également un axe de recherche très prometteur dans le domaine des actionneurs mécaniques, différents types de perturbations pouvant être utilisés pour induire la transition et le changement de propriétés mécaniques (thermique, optique, électrique, etc.). De même, l'utilisation de polymères électro-actifs connaît un essor important pour concevoir des dispositifs électromécaniques portables ou implantables sur substrats souples et étirables (muscles artificiels, implants, patches, etc.). De manière générale, l'exploitation de nouveaux principes de transduction doit être renforcée : optomécanique, biomécanique, mécano-chimique, etc.

La micro-nanomanipulation couplée à la détection et l'assemblage automatisé à une échelle réduite sont fortement d'actualité dans le domaine des nanosciences, de la microrobotique, de la biologie moléculaire et cellulaire.

Enfin, les tendances récentes dans le domaine des NEMS ont permis de tirer profit de la miniaturisation non seulement sur le plan fondamental dans le domaine des nanosciences (mécanique et optique quantiques) mais également sur le plan applicatif grâce au développement de réseaux de nanocapteurs couplant une sensibilité accrue à une grande section de capture (détection et cartographie par multiplexage fréquentiel par exemple). Les principaux enjeux concernent ici les problématiques d'adressage, de co-intégration CMOS et de traitement de données.

### 2. Microsources, récupération et stockage d'énergie

Le domaine de la récupération d'énergie mécanique tire un bénéfice très important de l'ensemble des développements décrits ci-dessus dans le domaine des capteurs mécaniques (nouveaux matériaux en particulier) mais peu de leur miniaturisation. En outre, si le développement de dispositifs harmoniques, puis large-bande et plus récemment accordables pour la récupération d'énergie via les vibrations environnementales reste d'actualité, un véritable enjeu concerne actuellement l'optimisation de la co-intégration du microsystème avec le circuit de conditionnement (conversion et gestion de l'énergie).

Enfin, des avancées notables dans le domaine des biopiles électrochimiques (glucose, bactérie, plantes) ou de la récupération d'énergie thermique (gradients, métamatériaux thermoélectriques) à l'aide de microdispositifs peuvent être mentionnées. On retrouve ici également les enjeux liés à la fiabilité des dispositifs et à leur durée de vie.

Précisons que les problématiques liées au stockage de l'énergie nous semblent relever principalement du domaine du génie électrique (cf. § V. Énergie électrique).

### Microsystèmes optiques

Depuis quelques années, c'est le domaine de la micro-instrumentation sous différentes formes (microscopie, spectroscopie et capteurs optiques) qui a pris le pas sur les applications télécommunications et sur le domaine de l'affichage (écrans). Les tendances actuelles sont également marquées par l'émergence de l'optofluidique pour des mesures et manipulations (piégeage, tri, etc.) *in situ* en milieu liquide, ou encore l'intégration de structures plasmoniques pour le développement de capteurs. D'un point de vue fondamental, le domaine des nanosystèmes optiques, pour lesquels la réduction d'échelle favorise l'exaltation de forces optiques et la manifestation de couplages opto-mécaniques forts, est actuellement très actif.

## Micro-Nanofluidique

Ce domaine est très demandeur de nouveaux matériaux (polymères en particulier) compatibles avec des procédés industriels bas coût et dont les propriétés sont stables dans le temps dans une optique de commercialisation. Ce besoin se traduit par un effort d'optimisation de nouvelles techniques de structuration : impression 3D, ablation laser, polymérisation multiphoton, *electrospinning*, *electrospray*, etc.

La microfluidique en gouttes (système diphasique eau/huile le plus souvent) est maintenant parvenue à un niveau de maturité suffisant (reproductibilité, stabilité de systèmes multiphasiques, contrôle des écoulements) pour être exploitée industriellement vers la biologie moléculaire et cellulaire, en particulier dans les domaines des microréacteurs chimiques et du diagnostic médical.

Des recherches actives sont menées pour exploiter les propriétés de confinement dans des systèmes fluidiques pour le tri et l'assemblage de particules ou d'entités biologiques : la réduction en taille des canaux et l'utilisation de diverses voies d'actionnement (électrique, magnétique, optofluidique, thermique, etc.) permettent de contrôler le mouvement d'objets dissous ou en suspension, et ainsi de les séparer dans des systèmes intégrés pour en étudier éventuellement les propriétés (lors d'un écoulement dans un nanocanal ou un nanopore par exemple).

Enfin, la fluidique permet d'élaborer des structures multicouches et de nouveaux nanomatériaux fonctionnels en contrôlant l'écoulement de solutions de polymères ou de particules dans des canalisations dédiées.

## Laboratoires sur puces

Si les problématiques liées à la détection ultime au niveau de la molécule unique restent d'actualité, beaucoup de travaux de recherche s'orientent actuellement vers la caractérisation de la cellule unique (cellules tumorales circulantes notamment). Néanmoins, les aspects essentiels, qui par ailleurs conditionnent la

valorisation et la commercialisation d'un laboratoire sur puce, concernent l'intégration des étapes initiales de traitement de l'échantillon : purification, extraction, tri, amplification, pré-concentration, etc. Le plus souvent, ces étapes doivent être effectuées sur plusieurs millilitres pour garantir la validité d'un test, dans le cadre d'une analyse médicale par exemple, le temps de réponse restant par ailleurs un élément clé du dispositif.

Le même effort de miniaturisation est également nécessaire pour l'étape de lecture, souvent de nature optique et pour laquelle l'intégration sur puce reste un verrou technologique à lever. Outre les domaines de la biologie et de la santé, l'environnement est un champ d'application relativement récent et moins exploré pour les laboratoires sur puce. L'impact sociétal est important, notamment pour aborder les problématiques environnementales de qualité de l'eau et de l'air.

Le déploiement des laboratoires sur puce sur les vêtements « intelligents » ouvre un champ de recherche impliquant le développement de systèmes de détection sur substrat souple. L'utilisation de matériaux biodégradables et/ou jetables est en plein essor avec de nouveaux supports comme le papier, la soie ou encore des substrats agrosourcés.

Le développement de puces permettant la culture de cellules (végétales ou animales) mais aussi la reconstruction 3D d'organes et de tissus en environnement contrôlé temporellement et spatialement (gradients chimiques, contraintes mécaniques) à des échelles millimétriques voire centimétriques est indéniablement un domaine en plein essor pour le diagnostic, le suivi thérapeutique, le criblage pharmacologique ou toxicologique.

Le développement de dispositifs implantables pour le diagnostic clinique, la stimulation, la délivrance de médicaments (systèmes patch, nanocapsules, etc.) ou pour suppléer un déficit sensoriel (implants cochléaires ou rétiniens) ou moteur (interfaces cerveau-machine) doit être renforcé en considérant l'autonomie énergétique du dispositif, sa biocompatibilité et sa durée de vie. En outre,

la conception d'interfaces électroniques pour la communication RF est incontournable pour rendre ces dispositifs aisément implantables et reconfigurables. Ici, apparaissent des questionnements éthiques car il faut bien distinguer les développements qui visent à réparer le corps humain de celles qui permettraient d'en augmenter les performances.

## D. Quelques remarques générales

Il est indéniable que la communauté MEMS/NEMS française a fortement bénéficié ces dernières années de la mise en place du réseau RENATECH. Elle est aujourd'hui positionnée au meilleur niveau européen et international. Il serait fortement préjudiciable à cette communauté que ce réseau n'ait plus les moyens de soutenir une infrastructure propre à fournir les technologies nécessaires à la réalisation des projets de recherche et de développement des laboratoires.

L'existence du GDRI NAMIS a permis de mettre en place un réseau de collaborations internationales très efficaces avec les meilleures équipes de la scène internationale. Il nous paraît important qu'il continue à être soutenu par INSIS.

De nombreuses équipes de recherche travaillant dans le domaine des MEMS/NEMS s'orientent de plus en plus vers des applications dans le domaine de la biologie et des sciences du vivant au détriment d'autres domaines applicatifs. Il peut s'agir d'un effet de mode ou d'un manque de financements pour d'autres secteurs, mais cette dérive pourrait devenir critique si elle s'inscrivait dans la durée. Il pourrait être opportun de profiter du renouvellement éventuel du GDR MNS pour lancer de nouvelles actions notamment en renforçant les interactions avec les domaines de l'automatique, de la robotique, des sciences des matériaux et de l'environnement.

Enfin, de manière générale, pour des projets à caractère applicatif, outre le caractère

innovant d'un dispositif, il convient d'être très attentif à définir très clairement sa valeur ajoutée par rapport à l'existant sur le marché industriel. Dans ce cadre, vu la maturité de certaines filières MEMS, une interaction plus forte avec le monde industriel via les structures de soutien à l'innovation et au transfert technologique serait certainement très bénéfique.

---

## III. Photonique/Ondes

---

Cette thématique, très bien représentée et animée par le GDR Ondes, recouvre, d'une part, le domaine des ondes électromagnétiques sur une plage étendue du spectre<sup>(1)</sup>, depuis l'électronique hyperfréquence jusqu'à certains composants XUV (y compris la gamme charnière des THz, en émergence); d'autre part le domaine des ondes acoustiques, notamment dans des guides structurés, périodiques ou quasi-périodiques (cristaux phononiques).

Le caractère «diffusant» des technologies considérées, qui s'appuient sur quelques principes génériques à vocation transverse, explique un éventuel recouvrement partiel avec d'autres sections. La diversité des fréquences de travail comme des champs applicatifs implique des problématiques spécifiques en termes de matériaux, supports, structures, systèmes, etc.

De façon générale, les recherches peuvent porter sur tout ou partie des points suivants :

- sources : laser, antenne, LED, oscillateur ;
- contrôle : amplificateur, façonnage d'impulsion, mise en forme du front d'onde, optique adaptative, milieux structurés, méta-matériaux ;
- transport : propagation en espace libre, guide d'onde, radio sur fibre, ligne de transmission, coupleur ;
- détection : antenne, photodétecteur, capteur, transducteur ;
- traitement : communications, imagerie, modulation, codage, cryptographie.

Parmi les sujets particulièrement étudiés, on note :

– la Photonique sur Silicium<sup>(2)</sup>, enjeu industriel majeur lié à l'interconnexion optique à plusieurs échelles (entre baies, entre microprocesseurs et entre les puces au cœur même des microprocesseurs), et à la faculté d'employer les technologies compatibles CMOS de la micro-nanoélectronique, désormais bien maîtrisées ; l'objectif est de pouvoir faire face à l'augmentation exponentielle du trafic de données tout en diminuant la consommation énergétique des *data centers* ; le sujet est loin d'être épuisé, la controverse faisant rage entre les tenants d'une photonique « tout-silicium » et les partisans d'une « intégration hybride », hétérogène ou monolithique, de composants actifs en semi-conducteurs III-V sur plate-forme Si ;

– la montée en fréquence de l'électronique millimétrique (60-80 GHz), qui pose de nouveaux problèmes en termes d'intégration système (de la prise de courant au dispositif) ;

– inversement, la descente en fréquence depuis l'infrarouge vers le « gap THz », avec les questions ouvertes en termes de sources, d'amplificateurs, de détecteurs, de systèmes ;

– l'optoélectronique reste un domaine très exploré (génération, détection, transport, traitement, cryptographie) sur toute la gamme du spectre électromagnétique ; il en est de même des télécommunications optiques, depuis la source (laser) jusqu'au détecteur (quantique) via le support même de la propagation (fibre optique spéciale, nano-structurée...) en passant par les protocoles de transmission de données (formats de modulation évolués) ;

– l'enjeu de la modélisation reste crucial, indispensable pour la conception des systèmes, souvent en rapport avec l'expérimentation. La puissance de calcul des ordinateurs modernes permet d'aborder des problèmes tels que la propagation d'une onde en milieu complexe (nano-structuré ou aléatoire, diffusant ou dépolarisant, inerte ou biologique) ; toutefois, si les équations de Maxwell n'ont jamais été mises en défaut durant leurs 150 ans d'existence, le calcul numérique continue de buter sur la limite en taille des cellules de

discrétisation. La diffusion multiple et l'échelle mésoscopique constituent des obstacles que différentes stratégies s'efforcent de contourner, avec des succès divers : approche multi-physique ou multi-échelle, modèle heuristique par équation de transfert radiatif, couplage analytique-numérique ;

– à cet égard, l'étude des *problèmes inverses* constitue une classe en soi, l'enjeu consistant par exemple à identifier ou à reconstituer un objet à partir de sa signature ondulatoire. Les liens avec l'*imagerie* sont importants, et l'on peut citer les techniques de retournement temporel (conjugaison de phase), avec des applications en microscopie, détection radar, sonde, scanner, imagerie bio-médicale, tomographie, échographie, IRM, etc. On peut d'ailleurs ici identifier un véritable verrou lié à l'imagerie en conditions extrêmes : extraction de données quantitatives dans un signal fortement bruité, applications nucléaires militaires ou civiles, etc.

– la modélisation analytique voit un retour en force du concept de *couplage d'ondes*, spatial ou temporel, qu'il s'agisse de l'interaction de résonateurs ou d'oscillateurs, de photonique discrète (*guidonique*, *couplonique*) ou de guides d'onde dits « à symétrie PT » ;

– le problème de l'*homogénéisation* apparaît capital pour les métamatériaux, ces assemblages nano-structurés dont les propriétés électromagnétiques *effectives* (permittivité diélectrique, perméabilité magnétique) sont sans équivalent naturel ; on peut le relier à diverses techniques mathématiques dites de transformation d'espace (changement de coordonnées) ; outre la *cape d'invisibilité* souvent citée, cette thématique évolue d'une part vers la gamme du visible, d'autre part vers l'inclusion de matériaux actifs ou quantiques, pour de nouvelles fonctionnalités toutes liées au contrôle du front d'onde ;

– les enjeux énergétiques ne sauraient être oubliés, depuis le développement de sources LED pour l'éclairage en lumière blanche jusqu'au photovoltaïque, en particulier utilisant la nanostructuration du matériau actif, avec de nombreuses implications économiques et sociétales (en liaison notamment avec ce qu'il

est convenu d'appeler *green photonics*), la réduction maximale de la consommation des systèmes passant par l'inscription de l'efficacité énergétique dans le cahier des charges ;

– l'ensemble du domaine bénéficie des progrès technologiques en micro- ou nano-fabrication (dans la foulée de l'hétéro-épitaxie des semi-conducteurs), mais aussi de l'apport de nouveaux matériaux tels que graphène, silicène, MoS<sub>2</sub>, phosphore noir, etc., dont la structure électronique spécifique se traduit par des propriétés optiques originales, linéaires ou non-linéaires (commutation ultra-rapide, etc.). Dans ce contexte, les propriétés photoniques des nano-objets (boîtes quantiques III-V ou colloïdales II-VI, nanofils, nanotubes, etc.) sont très étudiées ainsi que l'intégration de ces nano-structures dans les dispositifs optoélectroniques ;

– ces mêmes progrès en termes de techniques de fabrication permettent d'envisager l'intégration, sur des dispositifs photoniques, de composants à connotation plus spécifiquement « électronique » (nano-antennes) ; c'est dans cette direction que la *plasmonique* semble trouver ses applications les plus prometteuses. Quant aux progrès indéniables permis par le nano-usinage laser, il nous semble relever davantage de la thématique *Micro-nanotechnologies* ;

– la *nanophotonique* est un domaine en plein essor qui vise à confiner, contrôler et manipuler la lumière à très petite échelle (comparable ou inférieure à la longueur d'onde) en utilisant la nanostructuration du matériau. Ceci pour créer de nouvelles fonctionnalités en exaltant certains effets (propriétés non linéaires, couplage lumière-matière, etc.) ce qui ouvre la voie à de nouveaux dispositifs optoélectroniques ultracompacts et intégrables ;

– la *phononique* bénéficie également de l'ensemble de ces développements. Les matériaux acoustiques connaissent un essor considérable. Les investigations menées dans ce contexte ne se limitent plus au seul contrôle des ondes acoustiques et se tournent vers la gestion des phénomènes de transfert thermique. Dans ce dernier cas, les enjeux relèvent

aussi bien du domaine industriel, notamment de l'industrie du semi-conducteur, que d'une problématique énergétique, avec l'émergence récente de couplages entre phononique et thermoélectricité. La convergence entre dispositifs acoustiques ou mécaniques et dispositifs optiques est également prometteuse avec un potentiel avéré en physique fondamentale et en photonique radio-fréquence (résonateurs opto-mécaniques, cristaux phoxoniques) ;

– la convergence entre l'électronique et l'optique (les deux extrémités du spectre électromagnétique) se manifeste également au travers des dispositifs dits « opto-hyper » (transmission sur fibre de signaux radio modulant une porteuse optique) ;

– dans le domaine biomédical, où les technologies photoniques se sont longtemps cantonnées à un rôle d'observation et de diagnostic, on assiste à l'émergence progressive d'applications proprement thérapeutiques : on apprend à perturber ou à modifier de façon ciblée les propriétés d'une cellule vivante, favorisant par exemple le passage sélectif de telle ou telle substance à travers la membrane, etc. On peut également mentionner le domaine de l'optogénétique en plein essor actuellement.

Cette « matrice de lecture » permet d'appréhender les grands défis, mais aussi les effets de mode du moment. C'est ainsi qu'après les cristaux photoniques, puis les métamatériaux, l'accent porte de plus en plus souvent sur les différentes déclinaisons possibles de la *cape d'invisibilité*.

---

## IV. Électronique

---

### A. Généralités

« Électronique » désigne à la fois : (i) un domaine scientifique large allant de la physique des matériaux et des composants aux

circuits/systèmes et (ii) un secteur applicatif et économique couvrant de nombreux enjeux sociétaux (information et communication, économie numérique, environnement, santé, renouveau industriel). Dans le nouveau programme Européen H2020, l'électronique (Micro & Nanoélectronique) fait partie de l'une des sept Technologies Clés Génériques («*Key enabling technologies*»).

Aujourd'hui ce secteur de recherche aborde plusieurs verrous scientifiques et technologiques. Nous pouvons citer :

- la réduction énergétique des circuits et systèmes électroniques pour les applications nomades, embarquées ou plus encore pour le stockage massif de données numériques ;
- l'agilité des systèmes électroniques ;
- la variabilité des technologies incluant des problématiques de conception et de test ;
- le développement de technologies alternatives.

Outre des équipes CNRS et Universitaires, les principaux acteurs du domaine sont le CEA et l'INRIA. Ce domaine de recherche est également étroitement lié aux acteurs industriels (PME et grands groupes des secteurs de la microélectronique et des équipements).

## B. Micro & Nanoélectronique

### 1. Les dispositifs et filières technologiques

Les avancées en micro et nanoélectronique suivent deux axes appelés «*More Moore*» et «*More Than Moore*». Le premier axe vise à réduire la taille des transistors vers leurs limites physiques extrêmes de façon à servir le marché des micro-processeurs et des mémoires embarquées. Dans cette course à la miniaturisation, deux familles de transistors sont apparues, la famille des «TFET» dont la technologie planar FDSOI est un bon exemple et la famille des «FinFET» où le transistor 3D est constitué d'une grille verticale. Aujourd'hui, le nœud

technologique en développement possède une taille de grille de 14 nm, et les résultats à l'état de l'art présentent des transistors de taille de grille inférieure à 10 nm, voire 7 nm. Le deuxième axe vise un champ applicatif beaucoup plus étendu ; les technologies dérivées de cet axe peuvent être qualifiées de technologies *hybrides* répondant à un domaine d'application spécifique. On peut citer, par exemple : les technologies BiCMOS SiGe en développement qui ont des  $F_t/F_{max}$  de l'ordre de 500 GHz, et qui en recherche visent le THz ; ces technologies visent les applications millimétriques, voire THz ; les technologies GaN voire LDMOS sur SOI, qui visent les applications RF de forte puissance ; ces technologies en développement permettent la réalisation d'amplificateurs de puissance de l'ordre de 35 à 45 dBm, avec une efficacité PAE de l'ordre de 35 à 50 % dans les bandes de fréquence de 2 à 20 GHz ; les technologies de type Si/III-V, et III-V qui allient puissance et  $F_t/F_{max}$ , avec des densités de puissance de l'ordre de 300 à 400 mW/mm et des  $F_t/F_{max}$  de l'ordre de 500 GHz à 1 THz. Au-delà de ces approches conventionnelles, nous voyons émerger des filières comme par exemple : les transistors à effet de champ sur nanotube de carbone, ou CNTFET, avec des rapports  $I_{on}/I_{off}$  de l'ordre de  $10^6$  à l'état de l'art ; les BISFET «*Bilayer with symmetric valence and conduction Band*» adaptés à la structure du Graphène, et profitant de la forte mobilité des porteurs dans ce matériau ; mais aussi de nouvelles structures de FET comme les FET Tunnel ou les FET à grille ferroélectrique, qui permettent de réduire le saut de tension tout en maintenant un rapport  $I_{on}/I_{off}$  important, cette liste n'étant pas exhaustive.

### 2. Circuits/systèmes/test

Les circuits et systèmes intégrés sont représentés par deux grandes familles : les systèmes sur une puce, ou SOC (*System On chip*), et les systèmes dans un boîtier, ou SIP (*System In Package*). Le choix de s'orienter vers une solution ou l'autre dépend de l'obligation, ou non, d'utiliser plusieurs technologies dédiées pour répondre aux contraintes d'une application.

Dans une approche SOC, deux critères importants vont déterminer sa faisabilité et son coût : sa *testabilité*, parce que plus un circuit est complexe, moins il sera aisé de le tester, et plus le coût du test sera élevé ; son *agilité*, parce qu'un circuit complexe doit pouvoir s'adapter à la multitude de standards existants et émergents dans l'application qu'il vise. On donnera pour exemple l'application RF de connectivité, dite Wifi, regroupant les standards 802.11.a ; b ; g ; ac ; ad... qui utilisent des fréquences porteuses de 2,5 GHz, 5 GHz, et 60 GHz, et ont des bandes passantes de 5 MHz à 2 GHz.

En ce qui concerne la testabilité, la recherche s'est orientée selon deux axes principaux : le développement de techniques structurelles (modèles de défauts, modèles de fautes) et d'approches fonctionnelles permettant de tester et d'assurer la fiabilité des circuits numériques et mixtes (analogique-digital) embarqués ; la réalisation de fonctions de test embarquées dans le système (BIST ou «*Build In Self Test*») permettant au système de faire son propre diagnostic. La recherche dans le premier domaine s'est orientée vers les technologies de dernières générations, notamment en ce qui concerne le FinFET 3D ; dans le second domaine, il s'agit de développer maintenant les fonctions de test et de contrôle embarquées dans le système (BIST & BISC «*Build in Self Control*») permettant au système de s'auto-réparer après un auto-diagnostic.

Pour accroître l'agilité, le système doit devenir reconfigurable à tous ses niveaux. Par exemple, en radio, des systèmes ont été développés jusqu'à maintenant de façon restreinte par un logiciel de contrôle, (SDR «*Software Defined Radio*»), c'est-à-dire qu'au moins la fréquence porteuse et/ou la bande passante ne sont pas reconfigurables. L'objectif de la recherche pour ces prochaines années est de s'orienter vers des systèmes radio complètement reconfigurables, ce qui pose notamment le problème des filtres et des antennes qui ne le sont pas systématiquement.

Dans une approche SIP, donc multi-technologies, le principal verrou à lever est lié à la co-conception multi-physique, multi-technologie

et multi-représentation. Des problèmes de compatibilités restent à résoudre. Ils sont liés à la photonique (intégrée sur Si), à l'électromagnétisme (passifs métalliques, mais aussi encapsulation), à l'électronique analogique RF et millimétrique, à l'électronique numérique, à la mécanique (MEMS et NEMS), à l'électronique sur substrat organique mais également à la biologie, et ceci sur des représentations temporelles et fréquentielles. La modélisation multi-physique devient donc un enjeu important pour la réussite finale de l'application, cette approche ne peut être abordée que par une collaboration étroite entre acteurs maîtrisant chacun parfaitement son domaine.

Toutefois, quelle que soit l'approche retenue, il ne faut pas opposer SOC et SIP ; le système final sera certainement un SIP intégrant plusieurs SOC.

## C. Électronique organique – Électronique sur supports flexibles/déformables

Le domaine de l'électronique organique et/ou souple suscite depuis une vingtaine d'années un effort de recherche alimenté par les possibilités incroyables qu'offrent les semi-conducteurs organiques pour la production de composants et circuits à bas coût.

Aujourd'hui, les OLEDs représentent l'application la plus mature industriellement, avec l'intégration d'écrans OLEDs dans des produits commerciaux nomades (téléphones, tablettes, appareils photographiques, récepteurs de télévision). Cependant, les matériaux et les architectures sont de plus en plus complexes, rendant cette technologie prohibitive pour les applications liées à l'éclairage. La recherche s'oriente donc vers l'optimisation des dépôts par voie liquide pour les rendre compatibles avec les technologies d'impression, et également vers la simplification de l'architecture des OLEDs. Soulignons également l'apparition depuis 2012 de nouveaux dopants à fluores-

cence retardée. Ces derniers présentent l'avantage de ne pas contenir de métaux lourds et rares (comme les complexes d'iridium).

Les avancées dans le domaine du photovoltaïque organique sont constantes et la barre des 10% de rendement a récemment été dépassée. Le plus remarquable est certainement la « percée » des structures hybrides à base de pérovskites dont les rendements avoisinent les 20% après seulement cinq ans d'existence. L'effort de recherche est maintenant focalisé sur l'élimination du plomb dans ces matériaux et sur leur stabilité.

Enfin, les semi-conducteurs organiques peuvent aussi être des conducteurs ioniques. Cette « double propriété » est un atout considérable pour les applications biologiques. Une avancée majeure a consisté à réaliser un réseau de transistors à base de polymère conducteur imprimés sur un substrat de quelques micromètres d'épaisseur pour enregistrer un encéphalogramme. Le gain a permis d'enregistrer des signaux identiques à ceux obtenus avec des électrodes implantées dans le cerveau. Dans ce domaine, les progrès sont encore importants et les interfaces machine/vivant bénéficieront de ces avancées, notamment grâce aux travaux sur la peau électronique.

Les laboratoires du CNRS et du CEA sont bien identifiés et apportent des contributions majeures. Néanmoins, les moyens investis en Allemagne leur permettent d'être leader européen. Au niveau international, si l'Europe est très bien placée au niveau de l'innovation et de la recherche, l'Asie a phagocyté le marché de l'affichage OLED. Il est donc crucial de conserver en Europe les autres domaines d'application de cette industrie naissante.

## D. Spintronique

Les avancées récentes majeures en électronique de spin concernent entre autres la génération et l'injection des courants polarisés en spin et leur influence sur les nouveaux états magnétiques à l'échelle nanométrique, notam-

ment en tirant profit de l'interaction spin-orbite dont le rôle dans les systèmes métalliques ultra-minces commence à être mieux cerné. Ces quatre dernières années, le terme « spin-orbitronique » a ainsi fait une entrée remarquée comme partie importante de l'électronique de spin.

Le plus emblématique de ces nouveaux effets est l'effet Hall de spin comme source de transfert de spin, qui a prouvé son efficacité en premier lieu pour manipuler l'aimantation dans des structures mémoires métalliques, mais aussi dans des isolants par conversion entre courants de spins ou courants de magnons. La spincaloritronique (génération des courants de spin par des effets thermoélectriques) est également une thématique en plein essor. Les matériaux à transport non conventionnel (graphène, isolants topologiques...) ou à propriétés magnétiques originales (alliages de Heusler, alliages à très forte anisotropie, à très faible amortissement...) ou d'intérêt applicatifs (aimants permanents) seront encore vecteurs de nombreuses recherches à court terme. L'agencement de ces matériaux dans des systèmes électroniques (circuits non volatils, circuits « *instant on/off* », logiques, mémoires ou traitement magnonique de l'information) est également riche d'enjeux.

L'évolution très récente a également vu un intérêt marqué pour les états magnétiques chiraux possibles dans les systèmes manquant de symétrie d'inversion. Enfin, les mémoires magnéto-résistives à écriture par transfert de spin (STT-RAM) ont fait leur arrivée sur le marché en 2013. Leur essor requiert de nombreux développements, avec des volets matériaux, théorie et architecture de circuits.

En conjonction avec les équipes du CEA, les laboratoires CNRS sont particulièrement bien placés au niveau international sur les thématiques précitées. Beaucoup des thématiques de recherche de l'électronique de spin rejoignent les thématiques de la commission 03 du CNRS.



## E. Électronique Neuromorphique

Le cerveau et les systèmes biologiques en général constituent des moyens de traitement d'information et de calcul naturels évidemment performants qui dépassent les systèmes artificiels de plusieurs ordres de grandeur pour le compromis énergie-intégration. Il s'agit d'un thème intrinsèquement multidisciplinaire intégrant neurosciences, nanosciences, biologie, nanoélectronique, physique, mathématique, chimie, etc. Des résultats en rupture ont été récemment obtenus dans les différentes disciplines intervenant dans la conception et la réalisation matérielle d'architectures de calcul naturel. Au niveau international, l'effort industriel déjà mentionné (IBM, Hewlett-Packard, Qualcomm, Google, Yahoo, etc.) s'effectue en forte interaction avec d'importants projets partenariaux, tels que le célèbre projet Synapse de la DARPA, mais aussi le récent DARPA-Upside, la BRAIN Initiative aux USA, le Human Brain Project en Europe.

Au niveau français, l'intérêt des diverses communautés scientifiques pour la conception et la réalisation de systèmes bio-inspirés s'est manifestée ces dernières années par l'éclosion de nombreux projets ANR interdisciplinaires autour de ces thématiques ainsi que de multiples études préliminaires soutenues par la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS. Ces projets incluent des industriels français, tels que Thales, mais aussi des start-up, telles que GlobalSensing qui conçoit et fabrique des puces neuromorphiques, ProBayes (algorithmes Bayésiens), SpikeNet (exploitation de réseaux de neurones à impulsions) ou Kalray (traitement massivement parallèle fortement intégré).

Pour le périmètre de la section 08 et dans le cadre de ces nouveaux paradigmes de traitement de l'information, des approches alternatives à celles rencontrées dans la microélectronique conventionnelle engendrent actuellement des études couvrant les domaines des matériaux aux systèmes complexes. Nous pouvons citer

les nombreux travaux autour du *memristor*: dispositif électrique mimant la synapse en conservant un état de résistance après une brève excitation électrique (mémoires de type CBRAM, OxRAM, FeRAM...). La plupart des travaux relatifs à l'implémentation matérielle des systèmes bio-inspirés se sont concentrés sur la réalisation de synapses à partir de nanocomposants. Des travaux ayant des objectifs similaires sont également engagés en nanophotonique et spintronique.

*Le texte ci-dessus est extrait du document de création du GDR «BioComp».*

---

## V. Énergie électrique

---

Parmi toutes les formes d'énergie, la part de l'énergie électrique est incontestablement en forte croissance. Forme idéale d'énergie dans le sens où elle peut satisfaire tous les services énergétiques avec des performances inégalées, elle a cependant un défaut de taille : au plan mondial, elle est issue à près de 80 % de ressources primaires non renouvelables et souvent très polluantes avec un rendement de conversion relativement faible. Mais elle est, dans le même temps, la forme d'énergie finale qui a le plus grand potentiel de génération à partir de ressources renouvelables et ainsi, l'énergie électrique a la capacité de constituer un puissant moteur de développement durable. Pour ces raisons, les recherches en génie électrique au niveau mondial sont très largement orientées par les fortes préoccupations sociétales actuelles.

La flexibilité, la contrôlabilité et l'efficacité des dispositifs de conversion électrique rendent le vecteur électricité incontournable dans presque tous les domaines. Les recherches se situent à tous les niveaux de la chaîne et concernent les dispositifs de production, de stockage et de conversion finale. Ainsi, transports électriques, bâtiments intelligents et quartiers autonomes sont devenus des terrains de recherche majeurs de la communauté scientifique.

Dans ce contexte, les infrastructures électriques vivent un profond changement de paradigme, avec notamment l'arrivée massive de sources peu prévisibles et à haute variabilité, la bidirectionnalité des flux dans les réseaux et de nouveaux jeux d'acteurs.

Le vecteur électricité, dont la pénétration s'accélère également dans les applications embarquées, est soumis à de sévères contraintes, comme celles de masse, de fiabilité, d'efficacité... L'alimentation autonome en énergie de dispositifs électroniques, comme les capteurs communicants, conduit à rechercher de nouvelles solutions de «grappillage énergétique». Le secteur des procédés constitue un autre terrain applicatif riche pour la modélisation de phénomènes complexes: c'est par exemple le cas des systèmes de dépollution par plasma, des ozoneurs... Enfin, à l'interface du vivant, un champ important de recherche a émergé il y a quelques années, avec notamment la modélisation et l'étude des interactions des champs électromagnétiques avec la «matière vivante». La plupart de ces travaux aux interfaces avec d'autres domaines scientifiques se déroulent en collaboration étroite avec des équipes aux spécialités complémentaires (biologie, chimie...).

Outre les traditionnelles voies de conversion électromécanique (magnétique, piézoélectrique...) ou de conversion par électronique de puissance, l'électrochimie pénètre fortement le génie électrique, avec des travaux sur les accumulateurs électrochimiques, les piles à combustibles, les électrolyseurs, etc.

La convergence des technologies de l'information, de la communication et de l'énergie électrique («*smart grids*») est en œuvre partout dans le monde. Associée à la très grande complexité et à des données stochastiques, plus ou moins bien prédictibles, de nouvelles questions fondamentales émergent et sont largement traitées, notamment en collaboration avec les domaines des mathématiques appliquées et des STIC, par les chercheurs du génie électrique.

Et bien sûr, comme dans l'ensemble des sciences de l'ingénieur, les évolutions des contraintes nécessitent d'introduire de nou-

veaux concepts et d'optimiser les dimensionnements des chaînes de conversion pour réduire encombrement, masse, coûts, échauffements tout en améliorant encore les performances d'efficacité énergétique, de réduction des pollutions (électromagnétiques, acoustiques, vibratoires, environnementales...) ou encore de tenue aux environnements extrêmes. Dans ce contexte, il est fondamental de maîtriser les processus de vieillissement, qui doivent donc être mieux compris pour éco-concevoir les systèmes électriques du futur.

La modélisation numérique et, d'une façon générale, les méthodes numériques, jouent un rôle essentiel d'accompagnement des démarches de conception et d'optimisation, avec des challenges majeurs lorsqu'il s'agit de considérer l'ensemble du cycle de vie.

## **A. La caractérisation et la modélisation des matériaux**

L'évolution des performances des matériaux joue un rôle majeur dans le traitement de l'énergie électrique. Les principaux travaux de la communauté scientifique concernent :

- les magnétiques doux et durs (aimants), pour un accroissement des performances environnementales, de compacité ;
- les matériaux à grand gap (SiC, GaN et diamant) pour les semi-conducteurs de puissance ;
- des isolants liquides et solides, plus respectueux de l'environnement ;
- les supraconducteurs, en particulier à «haute température critique».

## **B. Les chaînes de conversion électromécanique d'énergie**

Activité historique du génie électrique, ce thème est en rapide évolution vers :

- de nouvelles structures électro-magnétiques pour la génération d'énergie, l'actionnement ou encore de nouvelles transmissions purement magnétiques, de nouveaux procédés comme la réfrigération magnétique ;

- des ensembles convertisseurs-machines à haute tolérance de défaillance, avec considérations de dimensionnement sur cycle et de compatibilité électromagnétique (CEM) ;

- de nouvelles solutions de conversion électromécanique, via des matériaux électro-actifs notamment pour les milli et microsystèmes pour l'actionnement ou le grappillage d'énergie vibratoire.

### **C. La conversion statique (électronique de puissance)**

Les structures de conversion statique jouent un rôle majeur dans l'efficacité énergétique, dans tous les secteurs de l'énergie, avec des exigences extrêmes de compacité, rendement, fiabilité. Les principales évolutions en cours sont associées :

- à l'arrivée des semi-conducteurs de puissance grand gap, une révolution qui soulève de nombreuses nouvelles questions en matière de CEM, d'intégration des *drivers* et d'opportunité pour de nouvelles architectures de conversion ;

- à l'intégration des composants de stockage (condensateurs et inductances), qui pose de nouveaux problèmes, comme celui de la recyclabilité.

- aux nouveaux besoins comme dans la transmission d'énergie sans contact, les systèmes de recharges rapides ou encore les convertisseurs à très haute tension pour les applications réseau (transmissions HVDC).

### **D. Le contrôle commande et le diagnostic des systèmes électriques**

Les problématiques de commande des systèmes électriques s'orientent aujourd'hui vers la gestion d'énergie (contrôle des puissances), généralement dans un environnement de plus en plus stochastique mais aussi avec de nouveaux critères.

Pour améliorer la disponibilité et globalement les performances de systèmes électriques de plus en plus complexes (réseaux d'énergie par exemple), leur diagnostic continu est indispensable, tant pour effectuer des reconfigurations que pour planifier des maintenances associées à des interruptions de service non subies.

Citons également la conception et l'étude de nouvelles architectures de commande, éventuellement reconfigurables.

### **E. Les réseaux d'énergie stationnaires et embarqués et les nouvelles sources**

Les réseaux électriques stationnaires, qu'il s'agisse des grands réseaux interconnectés ou des mini-réseaux, voire des installations autonomes, doivent s'adapter aux sources hautement variables (éoliennes et photovoltaïques) qui viennent complexifier le problème couplé de leur gestion et de leur dimensionnement. Le domaine des transports (terrestres, maritimes et aériens), qui s'électrifie de plus en plus (génération de bord, de la propulsion ou équipements), est également l'objet de recherches très actives. Parmi les nombreux dispositifs concernés dans ces réseaux, citons :

- les nouvelles sources d'énergie électrique (piles à combustible, photovoltaïque, éoliennes, hydroliennes, houlogénérateurs) ;

- le stockage d'énergie électrique qui est désormais au cœur de la plupart des systèmes.

Les problématiques scientifiques associées au stockage, qu'il soit électrochimique ou non, concernent son dimensionnement et sa gestion d'énergie avec la prise en compte du vieillissement.

## F. Les outils méthodologiques

Il s'agit d'un volet transversal dont on peut citer quelques sous-thèmes :

- la modélisation numérique des phénomènes électromagnétiques et couplés (multi-physiques) ;
- les approches multi-échelles et la réduction de modèles ;
- l'optimisation automatique et les problèmes inverses ;
- les modélisations légères adaptées aux optimisations de dimensionnement, notamment pour l'approche système ;
- les modélisations phénoménologiques et *ab initio* des lois de comportement des maté-

riaux, permettant notamment le passage de modèles microscopiques à des modèles macroscopiques.

---

## Conclusion

---

La lecture de ce document met en relief le caractère fortement multidisciplinaire des domaines de recherche couverts par la section 08. Il apparaît clairement que certains d'entre eux sont également abordés de façon complémentaire par d'autres sections en particulier les sections 03, 04 et 05 pour l'INP ; les sections 06 et 07 pour l'INS2I, les sections 09 et 10 pour l'INSIS ; la section 28 pour l'INSB et enfin la CID 54. La conception de nouveaux composants et de systèmes complexes se nourrit en effet de la richesse de ces interactions en tirant profit d'une meilleure compréhension de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques de l'échelle nanométrique jusqu'au monde macroscopique.

---

## Notes

(1) « La recherche française en optique photonique représente 200 laboratoires et 13 000 chercheurs. En reprenant un rapport publié par le gouvernement (technologies clefs 2015), selon un travail de l'Association française de l'optique photonique (AFOP), de la Société française d'optique (SFO) et des pôles d'optique, basé sur une consultation de 150 experts scientifiques et industriels, la photonique intervient dans 6 grands domaines rassemblant 21 technologies :

- télécoms : transmissions optiques courtes distances, fibres et composants, systèmes et réseaux ;
- santé et vivant : systèmes photoniques d'analyse pour la santé, systèmes d'imagerie médicale, capteurs photoniques pour le vivant, lasers pour la santé ;
- énergie, éclairage, affichage : LED et OLED, photovoltaïque, photonique et infrastructures de recherche, affichage et réalité augmentée ;

- manufacturing et contrôle : lasers et procédés industriels, techniques de fabrication de systèmes optiques, procédés industriels et mesures optiques ;
- surveillance, sécurité, spatial : systèmes d'imagerie complexes pour l'observation et la surveillance, capteurs d'images, sources capteurs et réseaux de capteurs ;
- matériaux et technologies génériques : nanophotonique et couches minces optiques, microélectronique et photonique, technologies et sources lasers, nouveaux matériaux et nouveaux composants. »

(2) Voir l'atelier *Photonique sur Silicium* organisé au siège du CNRS en 2013 [<http://workshopcnrs.ief.u-psud.fr/>].

Comité national de la recherche scientifique. « Section 08- Micro et nano-technologies, micro et nanosystèmes, électronique, photonique, électromagnétisme, énergie électrique ». *Rapport de conjoncture 2014*, [édition PDF en ligne]. ISBN : 978-2-271-08746-1. Disponible sur : <http://rapports-du-comite-national.cnrs.fr/>