

# 08

---

## ÉLECTRONIQUE, SEMICONDUCTEURS – PHOTONIQUE, GÉNIE ÉLECTRIQUE

Paul-Alain ROLLAND  
*Président*

Philippe Auriol  
Pierre Beauvillain  
Michel Bouthinon  
Henri Camon  
Yvon Cheron  
Catherine Chevallier  
Béatrice Dagens  
Michel De Labacherie  
Christian Ganibal  
Jacques Gautier  
Gérard Marchand  
Daniel Maystre  
Frédéric Mazaleyrat  
Denis Mencaraglia  
Antonio Munoz-Yague  
Jean-Louis Oudar  
Christian Pieralli  
Jean-Robert Roche  
Pierre Viktorovitch

*Mots clés :*

*Systèmes matériels, composants et matériaux fonctionnels pour l'information, la communication et l'énergie électrique Micro-nano-technologies*

La section 08 du Comité national de la Recherche Scientifique est, par essence, une section pluridisciplinaire qui couvre un large champ scientifique : électronique, électromagnétisme, optique, mais aussi mécanique et sciences des matériaux. Elle représente une communauté scientifique au cœur du développement des sciences pour les technologies de l'information, de la communication et de l'énergie et, est donc largement ouverte aux interactions et collaborations avec l'ensemble des acteurs de la recherche et de la technologie œuvrant au sein du CNRS. Sa spécificité peut se définir à travers la finalité de ses activités scientifiques et technologiques, à savoir « la synthèse d'objets (systèmes, composants et matériaux) fonctionnels pour l'information, la communication et l'énergie électrique ».

Le domaine d'activités scientifiques couvert par la Section est très large mais peut être décliné en 5 thèmes majeurs :

- fiabilité des systèmes de la conception à l'utilisation ;
- systèmes matériels pour l'information et la communication ;

- réseaux : aspects matériels et impact des technologies ;
- micro et nano-technologies pour l'électronique et la photonique ;
- ondes électromagnétiques et acoustiques.

## **1 – FIABILITÉ DES SYSTÈMES DE LA CONCEPTION À L'UTILISATION**

*Mots clés :*

*Matériaux, modélisation physique et optimisation, intégration et assemblage, aspects énergétiques, compatibilité électromagnétique, contrôle non destructif, usages.*

Un système fiable est un système optimisé, bien conçu et destiné à assurer une fonction déterminée de manière pérenne. La fiabilité du système, quelle que soit l'échelle, dépend toutefois très largement de propriétés locales tant au niveau du (ou des) matériau(x) constitutifs que de leur assemblage.

Les points suivants doivent donc être déclinés : matériaux, modélisation physique et optimisation, intégration et assemblage, aspects énergétiques, compatibilité électromagnétique, contrôle non destructif, usages.

Autant que possible, pour chacun de ces aspects des méthodes génériques devront être privilégiées

### **1.1 MATÉRIAUX**

Tous les matériaux des systèmes faisant l'objet des investigations de la section 08 sont susceptibles d'être étudiés dans le cadre d'une approche fiabiliste.

Ainsi dans les systèmes télécoms, l'optique et les matériaux qu'elle utilise cons-

tituent des enjeux majeurs. Concernant les matériaux, la modification et le contrôle des propriétés devraient permettre le développement de nouvelles fonctions. Des recherches doivent donc se poursuivre sur ces derniers qu'ils soient massifs, en fibres, en couches minces, etc.

Parallèlement, dans le cadre des matériaux fonctionnels pour l'électronique des travaux doivent être conduits sur :

- les semi-conducteurs : maîtrise des propriétés du Si et des matériaux III-V en dimension ultime, recherche concernant la fiabilisation des filières, nouveaux matériaux, SiC, GaN, Diamant, etc. ;

- les matériaux de l'environnement : packaging (substrat, encapsulation, connectique, isolants latéraux, passivation, etc.) ;

- les composants passifs : nouveaux matériaux haute température, céramique, etc. ;

- les couches minces pour la génération ou le stockage de l'énergie permettant autonomie et portabilité (filière silicium, chalcogénures, polymères, pour la conversion photovoltaïque, supercondensateurs carbone/carbone pour le stockage, etc.).

### **1.2 MODÉLISATION PHYSIQUE**

Elle doit s'effectuer à plusieurs niveaux. D'une part au niveau de la description précise des mécanismes physiques se produisant dans les matériaux envisagés mais aussi en prenant en compte les couplages tels qu'ils peuvent apparaître dans les matériaux « intelligents » (magnétostrictifs électrostrictifs, thermo ou électroadaptatifs, etc.). D'autre part, il s'avère nécessaire de cartographier précisément les contraintes sous lesquelles les matériaux de ces systèmes vont devoir évoluer. Celles-ci sont en général très différentes d'un système à l'autre et pour un même système, elles peuvent être très dispersées (formes, amplitude, durée, ambiance, etc.). L'étude de l'interaction des

propriétés intrinsèques des matériaux et des contraintes est un point clé de la fiabilité.

La modélisation physique des systèmes en vue de leur fiabilité est donc une approche hybride c'est-à-dire multicontraîntes, multi-matériaux.

### **1.3 INTÉGRATION**

L'intégration doit permettre la réalisation de systèmes de plus en plus complexes et plus performants, se fondant sur une approche hétérogène tant sur le plan des matériaux que des technologies à mettre en œuvre. Compte tenu du coût des technologies à mettre en œuvre, une méthodologie de conception en vue d'intégration s'avère nécessaire. Une hiérarchisation des problèmes qui constitue un des enjeux majeurs de ces recherches doit donc être développée. Ceci nécessite de trouver une adéquation algorithmes/architectures, des architectures compatibles avec l'intégration, et l'optimisation du rapport énergie/performances (par exemple architectures matériels/logiciels pour faible consommation).

Il faut donc concevoir en optimisant les propriétés des systèmes non seulement en régime normal mais aussi en régime extrême.

L'intégration fonctionnelle en électronique, c'est-à-dire l'association de composants électroniques, mais aussi de fonctions de protection ou de commande, est un exemple de recherche de fiabilisation des systèmes.

Un autre exemple est d'intégrer un système complexe majoritairement logique, sur une puce de silicium (SOC), destiné à s'adapter à de multiples applications et données (reconfigurables) et embarqué dans un équipement nomade (faible consommation).

Ce type de recherches doit se poursuivre tant dans le cadre d'associations monolithiques qu'hybrides.

Elles doivent aussi être étendues aux autres domaines de la section.

### **1.4 ASSEMBLAGE**

L'assemblage concerne un ensemble discret de matériaux différents ayant des fonctions spécifiques dans le but de réaliser des dispositifs. Le packaging en est une bonne illustration. Chaque maillon constituant le système doit être fiable, depuis la passivation jusqu'à l'encapsulation en passant par la (ou les) prise(s) de contact.

Dans ce cadre, les matériaux du contact électrique et la connectique de manière plus générale devront être sérieusement pris en compte.

### **1.5 OPTIMISATION**

La fiabilité des systèmes doit intégrer les différentes actions concernant l'optimisation des matériaux, des systèmes mais aussi des fonctions. Ce dernier aspect pouvant déboucher sur de nouvelles structures. Citons par exemple :

En électronique, l'utilisation de semi-conducteurs auto-protégés peut permettre la synthèse de nouveaux mécanismes de commutation et de nouveaux circuits à haute sécurité de fonctionnement. Considérant les protections intégrées non plus comme des « fonctions de protection » mais comme des fonctions de « commande » à part entière, de nouveaux mécanismes de commutation sont susceptibles d'être obtenus (par exemple autoblocables en sur-courant).

En optique, c'est l'optimisation des propriétés des matériaux (ferroélectriques, semi-conducteurs organiques, hybrides) présentant des effets non linéaires dans la gamme la plus étendue possible, avec les meilleurs rendements, qui est recherchée.

À partir de ces réflexions d'ordre général, il reste donc à accomplir un travail important en termes de classification, généralisation, synthèse des mécanismes particuliers mais

également en terme de faisabilité technologique et d'évaluation. La filière de fabrication du système devra elle aussi être optimisée. Enfin, sécurité et fiabilité seront rendues optimales par un recours à une grande redondance.

## **1.6 COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM)**

La fiabilité des systèmes passe aussi par la nécessité d'obtenir un niveau d'immunité ou de susceptibilité suffisamment élevée et un niveau de compatibilité adéquat afin de pouvoir fonctionner dans un environnement électromagnétique déterminé sans être perturbé ni perturber.

La demande vis-à-vis de ces problèmes va aller en augmentant soit pour assurer le bon fonctionnement du système (CEM fonctionnelle) soit pour respecter la réglementation (CEM Normative).

Ici aussi les problèmes à résoudre sont à plusieurs niveaux. Ils concernent les aspects « conception » qui devront prendre en compte ces phénomènes.

D'autre part, du fait de la nature hybride des systèmes actuels (association de systèmes de puissance, de circuits numériques et de commande à distance (électronique RF)) il convient d'appréhender le problème dans sa globalité i. e dans des bandes de fréquences distinctes (du DC au MHz voire au GHz). Il serait donc souhaitable que les différents aspects que nous avons signalés soient développés dans le futur.

En résumé une approche multibande, multidimensionnelle, est fortement souhaitée.

Enfin, les interactions ondes/milieux vivants ou avec l'environnement devront aussi être abordées à ce niveau.

## **1.7 DIAGNOSTIC ET CONTRÔLE NON DESTRUCTIF**

La fiabilité des systèmes passe aussi par la connaissance précise de leurs propriétés et de l'état d'évolution de ces dernières lors du vieillissement. Il s'avère donc important de maîtriser les phénomènes physiques qui en sont à l'origine et de définir les observables susceptibles d'être utilisées. La fiabilité prévisionnelle, approche expérimentale et statistique des taux de défaillance, est en ce sens complémentaire de la précédente. D'autre part, dès leur création, la recherche dans ces systèmes du « zéro défaut », ou bien de la neutralisation du défaut, nécessite une excellente connaissance de ces observables caractéristiques.

Dans un cas comme dans l'autre, il faut donc développer des méthodes permettant l'obtention d'un diagnostic qui puisse être avéré et précis mettant en œuvre des méthodes non invasives, si possible sans contact, non destructives et répétables. Ceci devant être effectué tant dans le cadre de la conception que dans celui de la maintenance.

Il faut donc mener des études tant au niveau de la compréhension des mécanismes induits (recherche d'observables) qu'à celui de leur détection et de leur traitement (capteurs). Parmi les différentes méthodes susceptibles d'être utilisées, une attention particulière devra être portée à celles relevant de l'optique, de l'électrooptique, de l'imagerie électromagnétique, des ultrasons focalisés et en champ proche, et de la microscopie en champ proche (AFM, etc.).

Il s'agira d'obtenir un spectre de caractérisation très large, précis, rapide et en temps réel.

Enfin, dans le cadre des « matériaux intelligents » le développement intégrant, dès leur conception, ces capteurs doit être envisagé.

## 1.8 USAGES

Des plateformes de type structures ouvertes d'évaluation de la fiabilité, nécessairement spécialisées sur les fonctions spécifiques des systèmes devront être créées.

Elles seront développées pour produire par exemple des bases de données (du type de celles développées par le CNET ou du type Military Handbook 217 version F américain) et des modèles de défaillances paramétriques, issus de la fiabilité prévisionnelle, sur la base de l'ensemble des études précédemment explicitées.

Enfin, il ne saurait y avoir de fiabilité sans la prise en compte de l'utilisateur à travers :

- l'ergonomie ;
- le développement de l'intelligence artificielle ;
- les interactions Hommes Machines.

Autant d'aspects qui, en plus des « modélisations systèmes » (nécessitant des simulations lourdes tant temporelles que spatiales) et « traitement (du signal et/ou des données) » exigent les compétences de nos collègues de la section

« Information et Communication au service de la Société ». Ce slogan générique suscite le développement d'un grand nombre d'applications dans des champs très variés et le plus souvent pluridisciplinaires. Il s'agit de créer de nouveaux concepts qui permettront d'améliorer les conditions de vie des citoyens (incluant la vie de tous les jours, la santé et la sécurité). La notion émergente d'Objets Communicants en est un bon exemple. Ces nouveaux concepts devront représenter des améliorations notables sur le plan de la fiabilité, de la souplesse d'utilisation (agilité, reconfigurabilité) ainsi que des performances. Par ailleurs, à fonctions données, les concepts et procédés de fabrication mis en œuvre devront permettre des réductions significatives des coûts de revient afin d'assurer une large diffusion des objets correspondants. Parmi les performances, celles qui retiendront le plus notre attention sont liées à la sensibilité des équipements, aux débits de communication, au rendement des générateurs de signaux (faible puissance d'alimentation et forte puissance de sortie). Il faut enfin souligner que certaines de ces performances ne pourront être atteintes que par une intégration fonctionnelle qui caractérise les technologies microsystèmes (MEMS et / ou MOEMS). Afin de répondre à ces impératifs de performance, nous allons détailler les recherches qu'il est important de développer tant sur le plan technologique que sur le plan modélisation, conception et caractérisation. En particulier, les recherches seront menées suivant trois axes principaux qui concernent l'exploitation des technologies photoniques, des technologies électroniques et de l'association simultanée de l'optique et de l'électronique.

## 2 – SYSTÈMES MATÉRIELS POUR L'INFORMATION ET LA COMMUNICATION

*Mots clés :*

*matériaux, composants, dispositifs, génération, transport et réception de signaux, stockage d'information, visualisation physique, métrologie temps-fréquence, localisation, microsystèmes, capteurs, systèmes intelligents ;*

*domaines électroniques, optique et micro-ondes : frontières et complémentarités ;*

*plateformes technologiques.*

### 2.1 MATÉRIAUX POUR L'INFORMATION ET LA COMMUNICATION

Que ce soit pour les applications photoniques ou électroniques à des fréquences millimétriques (> 30 GHz), les technologies III-V à base de GaAs et d'InP sont toujours celles

de prédilection car elles permettront de développer des systèmes de communications à très haut débit. Il s'agit, de développer des techniques de croissance de matériaux très précises ainsi que les techniques de photolithographie associées (e-beam, RX, nano-imprint, etc.), car les dimensions des structures mises en jeu sont de plus en plus petites. Les techniques de report de matériaux peuvent aussi s'avérer très utiles pour la fabrication de structures hétérogènes. D'autre part, pour l'optoélectronique sur GaAs, il est nécessaire de mener des recherches sur les technologies autorisant des applications dans le domaine du visible et des fenêtres « télécom » (alliages GaInAsN). On peut également citer la recherche de nouveaux matériaux actifs (verres ou cristaux dopés aux terres rares) pour réaliser l'amplification optique au moyen de dispositifs en optique intégrée, et non plus avec des fibres dopées. Finalement, pour des communications optiques à forte densité d'intégration, la filière silicium continue d'être étudiée par l'intermédiaire des hétérostructures IV-IV (SiGe, Ge/Si etc.).

Le silicium occupe une place importante pour toute une catégorie d'application de télécommunications (< 30 GHz). Dans ce contexte, des recherches doivent être menées sur les hétérostructures Si/SiGe et Si/SiGeC de basse dimensionnalité afin de mieux maîtriser les contraintes ainsi que les profils de dopages dans ces couches. D'autre part, les technologies MOS ultimes continuent d'être étudiées par l'intermédiaire de nouveaux matériaux (grilles métalliques et diélectriques à forte permittivité), afin d'augmenter les fréquences de fonctionnement tout en conservant de bonnes caractéristiques électriques. Finalement, dans le but de développer des technologies de circuits intégrés sur silicium, des travaux sont menés pour l'amélioration des interconnexions par l'intermédiaire de l'utilisation de nouveaux matériaux (métaux, polymères, organiques ou encore diélectriques à faible permittivité diélectrique).

Les matériaux intervenant dans le stockage de l'information (notamment ferroélectriques, piézoélectriques, chalcogénures) sont particulièrement importants et doivent être étudiés pour améliorer leurs propriétés et leur fiabilité.

Pour les applications de traitement de l'information optique (routage, conversion de longueur d'ondes, etc.), il faudra développer et mettre en application des matériaux non-linéaires optiques, électro-optiques ou magnéto-optiques. Les matériaux à bande interdite photonique sont également très prometteurs pour réaliser de nouvelles fonctions ultra compactes de traitement optique (multiplexage, filtrage, etc.).

Pour toutes les applications microsystèmes, à la fois dans le domaine de l'optoélectronique et de la microélectronique, il est important d'accentuer le développement des techniques de micro-usinage de volume et de surface ainsi que les techniques d'assemblage monolithique et/ou hétérogène bidimensionnel ou tridimensionnel. Pour ces applications microsystèmes, des études devront être menées sur les matériaux actifs en couches minces (magnétiques, ferro-électriques, piézo-électriques, à mémoire de forme, etc.).

Finalement pour ce qui concerne les applications de puissance ainsi que la gestion de l'énergie à l'intérieur des systèmes matériels, des travaux seront menés sur les matériaux « grand gap » (SiC, GaN, diamant) en insistant sur les procédés à mettre en œuvre pour minimiser les défauts et dislocations. Il faut également souligner que les matériaux grand gap trouvent des applications en optique et en photonique.

Enfin, des recherches seront menées sur les moyens de production et stockage de l'énergie (accumulateurs, cellules photovoltaïques, piles à combustibles, etc.).

## 2.2 LES COMPOSANTS ET LES DISPOSITIFS

### Photonique

Il est important de développer des briques de base génériques pour les trois longueurs d'onde principales (0.85  $\mu\text{m}$  pour les courtes

distances, 1.3  $\mu\text{m}$  pour les réseaux d'accès et de distribution et 1.55  $\mu\text{m}$  pour les réseaux de transport). Il apparaît en effet aujourd'hui capital de pouvoir disposer de générateurs de signaux optiques (sources laser) compacts et de qualité. Il est donc nécessaire de développer de nouvelles sources laser (donc solides), puissantes, et accordables en longueur d'onde, que ces sources délivrent des signaux continus ou impulsions, qu'ils soient monochromatiques ou large bande. Les applications sont nombreuses : capteurs et métrologie, télécommunications optiques à haut débit, nouveaux systèmes d'imagerie, environnement, etc. Il faut pour cela acquérir la maîtrise du spectre et du profil spatial des sources laser et savoir coupler ensemble plusieurs émetteurs, tels des barrettes de diodes laser par exemple, afin d'obtenir une luminance la plus élevée possible. Les composants à cavité verticale seront étendus à des modulateurs ou des détecteurs qui permettent d'améliorer l'intégration. Pour les processeurs optiques, il faudra développer des sources à ultra-faible consommation, intégrés de manière dense sur des substrats adéquats. Il faudra également développer l'intégration des sources sur Silicium (voire la photonique tout-Silicium), pour améliorer l'interface avec l'électronique.

## Électronique

Il sera nécessaire de développer des composants capables de fonctionner dans le domaine THz/ps (par exemple pour les réseaux à ultra haut débit). Cela se fera dans un premier temps par des réductions des dimensions des composants actuels (transistor bipolaire à hétérojonction, transistor à haute mobilité électronique). Puis, il s'agira de définir des composants en rupture technologique : transistor à un électron, diode à effet tunnel résonant intégrée avec un composant à effet de champ, composants à interférences quantiques, composants utilisant l'électronique de spin et électronique moléculaire. Dans le domaine de la microélectronique silicium, les travaux sur les composants bipolaires et sur les

composants à effet de champ à base de technologies SiGe ainsi que sur les technologies MOS ultimes ( $< 70 \text{ nm}$ ) seront menés dans un souci d'amélioration de la sensibilité des systèmes de communication (bruit, linéarité, consommation et fiabilité). Au niveau des composants de puissance, les filières HBT et FET sur GaAs doivent continuer à être étudiées (amélioration du rendement et de la fiabilité des composants) et des efforts importants doivent être menés sur les composants à base de SiC et GaN. Ces nouveaux concepts devront être développés dans le souci d'une utilisation dans un système de communication, c'est-à-dire connecté au monde extérieur. Pour cela, des composants d'interface comme par exemple des antennes de type « reflect arrays » sont nécessaires, ainsi que des filtres très sélectifs à des fréquences de plus en plus élevées.

## Capteurs

Ce sont également des éléments clés des systèmes d'information (informations physiques, voire chimiques et même biologiques) qui vont devenir de plus en plus nombreux, sensibles et précis. Leur efficacité sera amplifiée par leur variété (multicapteurs), et leur « intelligence ». Pour cela, ils seront associés à des systèmes de traitement bas niveau (éventuellement bio-mimétiques comme les rétines artificielles par exemple) ou de fusion de données au niveau matériel afin d'obtenir une certaine « Intelligence ambiante ». La multiplication dans l'espace de capteurs identiques est également utilisable pour des systèmes de surveillance et contrôle de l'environnement (par exemple le contrôle d'écoulements fluidiques complexes ou le « contrôle santé » dans l'aéronautique).

## Microsystèmes

Les développements technologiques doivent être mis à profit pour la réalisation des briques de base des microsystèmes : actionneur, capteur, transducteur, récepteur. En ce

qui concerne les MEMS, on peut citer les MEMS RF (filtres, résonateurs) qui permettent de réaliser des composants « agiles » (accordables ou reconfigurables) sous l'action d'une force électrostatique, qui sont de première importance pour les communications multi-standards. Leur utilisation passe par des techniques d'assemblages spécifiques avec des circuits intégrés. La deuxième catégorie concerne les applications liées à la santé et à la biologie qui consiste à réaliser des systèmes miniaturisés comportant des matrices de sondes moléculaires ou bien de cellules biologiques, ainsi que des éléments de fluide et d'électronique permettant l'acquisition automatique d'informations inscrites à l'échelle moléculaire. Quand le signal vecteur est de nature optique, il s'agit des MOEMS que l'on peut diviser en deux grandes catégories. La première concerne les composants fonctionnant selon les principes de l'optique géométrique pour la commutation spatiale de la lumière (obturateurs de faisceaux, micro-miroirs pivotants ou rotatifs, etc.), selon les configurations les plus variées, s'agissant en particulier des procédés d'actionnement. La deuxième catégorie concerne les composants basés sur des principes d'optique physique. C'est le cas, par exemple, des micro-cavités optiques de type Fabry-Perot, des miroirs d'optique adaptative, ainsi que des microsystèmes utilisant des micro-optiques diffractives. Le temps de réponse de ces dispositifs, qui présentent l'avantage d'un contraste très élevé, est cependant limité à plusieurs dizaines de  $\mu$ s.

## CAO

La réalisation de tous ces composants avancés pour l'optoélectronique et/ou la microélectronique devra faire intervenir des techniques de conception et de modélisation spécifiques incluant des simulations physiques, électromagnétiques, thermiques et mécaniques. En particulier, de nouveaux outils de CAO devront être développés pour la simulation de nanocomposants optiques, électroniques ou acoustiques. Des couplages entre ces simulateurs physiques et des simulateurs électriques

seront réalisés pour développer des modèles de composants compatibles avec les logiciels de CAO conventionnels, en vue de la conception de systèmes. Pour tous ces composants, il faudra veiller à explorer les possibilités offertes par les structures nanométriques, par les nouveaux matériaux organiques (OTFT, OLED, lasers organiques, etc.), ainsi que les associations possibles avec la micromécanique et la biologie.

## 2.3 SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE COMMUNICATION

Au niveau photonique, des recherches doivent être menées sur des systèmes « tout-optiques » pour des réseaux longues distances et courte distance ou encore pour des communications intra-puces et inter-puces (« smart dust »). Ce dernier concept se traduit par des changements importants car les liaisons sont maintenant considérées comme partie intégrante du système et soulèvent des problèmes de diaphonie, de compatibilité électromagnétique etc. D'autre part les architectures des réseaux vont également conditionner les performances de ceux-ci, et il est nécessaire de définir des règles de conception « robustes » qui permettront de réaliser des systèmes performants alliant les avantages de l'optique et de l'électronique.

En ce qui concerne les communications radioélectriques, des recherches sont à mener pour améliorer le débit d'informations, tout en conservant un très haut degré de sécurité dans le système de communication par l'intermédiaire de nouvelles techniques de modulation (MC-CDMA Multi carrier-Code Division Multiple Access ou UWB Ultra Wide Band system). Pour ces systèmes de communication, des recherches sur les architectures reconfigurables sont indispensables pour augmenter la souplesse d'utilisation des futurs équipements (GSM, UMTS, Hiperlan, Bluetooth). D'autre part, les réseaux pico-cellulaires à 60 GHz doivent continuer à constituer une

préoccupation de recherche importante car ils représentent une alternative intéressante par rapport aux communications optiques.

Enfin les systèmes à grandes surfaces sont envisageables dans l'optique de réductions de coûts. Une première partie concerne les composants actifs et passifs discrets sur verre ou sur plastique pour des applications à fort volume. Il est également envisagé des circuits intégrés de type LSI en Silicium polycristallin.

Un point qui nous semble important concerne tous les problèmes liés à l'autonomie des équipements portables incluant l'intégration de nouvelles sources d'énergie et le contrôle automatique de la consommation (« battery management »).

Enfin, des méthodologies de conception au niveau système devront être développées pour répondre aux impératifs de performances demandés. En particulier, elles devront évoluer vers l'intégration de systèmes de plus en plus complexes avec des durées d'obsolescence de plus en plus courtes. Des blocs fonctionnels déjà validés (appelés IP ou composants virtuels) devront être de plus en plus utilisés. De ce fait les outils de CAO conventionnels devront évoluer en prenant en compte les aspects systèmes et en ayant recours au prototypage à des fins de validation.

## 2.4 VISUALISATION

Au niveau de la visualisation physique, il est nécessaire de mener des recherches au niveau des matériaux d'une part (Si mono et poly cristallin pour les écrans à cristaux liquides, diodes électroluminescentes organiques pour les écrans luminescents, croissance organisée de nanotubes de carbone pour les écrans à émission de champ ou encore les écrans à matrice active sur les substrats souples). D'autre part, il est important de développer des recherches sur les architectures d'écrans, les techniques d'adressage, etc.

## 2.5 STOCKAGE DE L'INFORMATION

Aucun dispositif de stockage existant ne répond aux énormes besoins du très proche futur, en termes de capacité, de vitesse d'accès, de durée de vie et de prix. Pour tenter de répondre à ces besoins des recherches très actives sont menées par de très grandes compagnies (IBM, Lucent, etc.) regroupées en consortia, néanmoins, aucun système de stockage de masse ne semble s'imposer. De nombreuses pistes restent ouvertes : il en va ainsi des mémoires à enregistrement surfacique de type magnétique, magnéto-optique, en champ proche, à sonde AFM, etc. C'est également le cas pour les mémoires à enregistrement de volume, telles que les mémoires holographiques, à « hole burning » spectral, à enregistrement bi-photonique, etc. Il faut dire que les performances des mémoires existantes sont très exigeantes (3 bits/ $\mu\text{m}^2$  pour un DVD actuel).

Un système de stockage ne peut être optimisé qu'en considérant de façon globale le couple matériau – processus d'enregistrement. L'optimisation passe en effet par la modélisation de l'interaction champ-matière ce qui nécessite une collaboration très étroite entre physiciens et chimistes. Il ne se limite cependant pas au seul support d'enregistrement, ainsi les mémoires optiques doivent prendre en compte tous les systèmes périphériques d'adressage, de suivi de piste ou de mise en forme des faisceaux optiques, qui nécessitent des composants micro-optiques et micro-électro-mécaniques. Par exemple, une des limitations des mémoires holographiques provient des aberrations géométriques des têtes d'écriture et de lecture.

Un dispositif de stockage est également indissociable du traitement des données à l'enregistrement et à la relecture (algorithmes d'égalisation des données, de codage et de décodage). Ces algorithmes sont prévus pour corriger les imperfections du dispositif et ne peuvent être définis qu'en fonction de la physique du principe d'enregistrement.

Le stockage optique de l'information est donc par essence un sujet pluridisciplinaire qui peut être un thème fortement fédérateur entre de nombreux laboratoires du CNRS

## **2.6 MÉTROLOGIE TEMPS-FRÉQUENCE**

Les demandes de performances en terme de stabilité des sources micro-ondes et optiques se traduisent par des contraintes de bruit de phase draconiennes. Cela suscite des recherches sur des standards de fréquence à base de sources d'atomes chauds ou refroidis, synchronisées sur des oscillateurs micro-ondes à faible bruit de phase. Dans ce cadre, des recherches de topologies d'oscillateurs à faible conversion du bruit seront nécessaires. Des efforts sont également à poursuivre sur les techniques de caractérisation de ces circuits.

## **2.7 COMPLÉMENTARITÉ DES DOMAINES ÉLECTRONIQUE, OPTIQUE ET MICRO-ONDES**

Une mention particulière doit être faite concernant les ondes submillimétriques (longueur d'onde dans le vide typiquement comprise entre 30 micromètres et 1 mm), qui permettent des solutions originales issues à la fois des techniques hertziennes (structures guidées, antennes, etc.) et des techniques optiques (interférométrie, par exemple). Outre les « niches » bien connues (spectroscopie de laboratoire ou embarquée, radioastronomie, diagnostic des plasmas de fusion), des terrains nouveaux dans le domaine de l'imagerie et des communications pourraient s'avérer fertiles. Les recherches sur les sources (solides) et détecteurs (à faible bruit) sont en particulier d'importance dans ce domaine.

## **2.8 PLATEFORMES TECHNOLOGIQUES, LOGICIELLES ET DE CARACTÉRISATION**

La réussite dans les recherches des systèmes matériels pour l'information et la communication sera fortement liée aux efforts de recherche en matière de technologie. Dans ce contexte, et compte tenu des équipements lourds à mettre en œuvre, il est important de développer ou de renforcer des plateformes technologiques qui pourront être accessibles à tous. En particulier, une plateforme spécialisée sur les structures nanométriques peut s'avérer très utile pour développer des composants nouveaux. Il est important de maintenir des efforts technologiques importants pour garantir l'indépendance nationale vis-à-vis des systèmes de télécommunications. D'autre part, le caractère pluridisciplinaire de beaucoup d'applications, ainsi que la nécessité d'utiliser ou de développer des logiciels physiques, mécaniques, thermiques et électromagnétiques se traduit par la nécessité de mettre en place des plateformes logicielles dédiées aux systèmes matériels. Le même besoin se fait sentir en ce qui concerne la caractérisation des circuits de télécommunications.

## **3 – RÉSEAUX : ASPECTS MATÉRIELS ET IMPACT DES TECHNOLOGIES**

### **INTRODUCTION**

*Mots-clés :*

*transmissions à très haut débit, communications numériques optiques, réseaux tout-optiques, interfaces optique-électronique, sécurisation de l'information, relation entre technologies matérielles et logicielles.*

La demande créée par les nouvelles formes de communications (commerce électronique, distribution musicale ou logicielle en ligne, vidéo à la demande, etc.) et celle créée par la place grandissante de l'informatique dans la société motive la recherche de technologies toujours plus efficaces en terme de capacité pour la transmission et le routage des données. Or toute innovation majeure dans les technologies matérielles a des conséquences importantes sur l'architecture des réseaux et les protocoles de communication. Par ailleurs, pour des raisons économiques, l'évolution des réseaux de télécommunications se fait nécessairement sur une échelle de temps assez longue, car elle implique d'importants coûts d'infrastructure. Il est donc impératif d'explorer et d'expérimenter suffisamment à l'avance les voies porteuses de nouvelles technologies, de façon à permettre aux acteurs économiques du domaine d'effectuer « les bons choix » technico-économiques en matière de développement des réseaux de télécommunication et de transmission de données.

Le domaine le plus actif à l'heure actuelle en matière d'évolution technologique pour les réseaux est sans conteste celui de l'optique, grâce aux avancées récentes dans le domaine des composants et des systèmes optiques. La très grande bande passante des infrastructures en fibre optique ne peut pour l'instant être utilisée que très partiellement dans les réseaux existants (locaux ou longue distance) car leur mode de fonctionnement impose de très nombreuses conversions optique/électrique/optique lors de la traversée de chaque nœud intermédiaire (routeur, commutateur, régénérateur) entre la source et le destinataire. Ceci amène à envisager de plus en plus sérieusement la mise en œuvre de *réseaux tout-optiques*, qui permettront le transport de données sous forme optique sans aucun retour au niveau électrique. Notons par ailleurs que le problème se pose différemment pour les réseaux de transport et les réseaux d'accès : pour ces derniers, les solutions basées sur les fibres optiques ne sont probablement pas les plus économiques (au moins à court terme), et les transmissions par voie hertzienne semblent pour le moment offrir un excellent compromis

en termes de bande passante et de coût. Enfin le développement des nouvelles formes de communications entraînera un développement inévitable des besoins en matière de confidentialité et de *sécurisation de l'information*.

### 3.1 RÉSEAUX TOUT-OPTIQUES

La technique du multiplexage en longueur d'onde WDM permet, en superposant sur une même fibre des dizaines de porteuses modulées à plusieurs Gbit/s, d'augmenter d'un facteur 10 à 100 la capacité des fibres optiques. Ayant atteint un bon stade de maturité technique, elle est donc devenue incontournable et les recherches de solutions nouvelles en matière de réseaux optiques doivent impérativement la prendre en compte. On peut attribuer ce développement rapide à deux raisons principales : la relative facilité de mise en œuvre des opérations complémentaires de multiplexage et démultiplexage WDM, au moyen des OADM (optical add and drop multiplexer) par réseaux de Bragg photo-inscrits ou par réseaux de diffraction, et la possibilité d'amplification simultanée de tous les canaux WDM par un seul amplificateur à fibre dopée à l'erbium. Ces deux fonctions sont précisément réalisées de façon tout-optique et l'on voit clairement sur ces exemples l'avantage apporté par l'absence de passage par l'intermédiaire de signaux électriques (il faudrait en effet autant de régénérateurs électroniques que de canaux en longueur d'onde). L'évolution vers les réseaux tout-optiques peut se décliner sur deux plans : celui de transmissions à très haut débit, et celui du routage tout-optique, ainsi qu'en terme de déplacement des interfaces avec l'électronique.

#### Transmissions à très haut débit

La recherche internationale dans ce domaine est très intensive, et d'énormes progrès ont été accomplis au cours de ces dernières années notamment vers des débits de transmission qui dépassent le Tbit/s. De

tels débits sont par combinaison du multiplexage WDM et du multiplexage temporel (par exemple 16 canaux à 10 Gbit/s). Une des tendances est d'augmenter les cadences de modulation de 10 à 40 Gbit/s par canal par utilisation de modulateurs électro-optiques ultra-rapides. À plus long terme, plusieurs voies d'évolution commencent à se dessiner : l'évolution vers des débits encore plus élevés, typiquement 160 Gbit/s par canal, l'extension du domaine spectral utilisé pour les transmissions WDM, et l'optimisation des formats de codage. Notons que les spécifications WDM se durcissent de plus en plus en termes de gammes d'accordabilité, qui devront couvrir au moins la bande entière entre 1300 nm et 1600 nm, et de distances entre canaux (on parle maintenant de 25 GHz, 25 dB). Plusieurs thèmes de recherche peuvent être identifiés, qui concernent les différents maillons d'une transmission optique :

### **Émission**

La généralisation du mode WDM implique le développement de sources laser à faible bruit, et d'excellente qualité spectrale. De plus, compte tenu des limitations de rapidité des modulateurs électro-optiques et de leur électronique de commande, le passage aux débits plus élevés se fera préférentiellement par multiplexage temporel optique (OTDM). Pour cela il conviendra de développer des sources compactes d'impulsions ultra-courtes dans le domaine de longueur d'onde des transmissions WDM.

### **Transmission**

La transmission tout-optique sur de longues distances implique la régénération optique des signaux à différents niveaux de complexité : R, 2R, 3R. Au premier niveau, la réamplification, il est important d'élargir la gamme spectrale des amplificateurs optiques, selon une tendance déjà amorcée : diversification des milieux actifs en émission stimulée, amplification Raman, ou amplification paramé-

trique à très large bande. Au second niveau, celui de la remise en forme des signaux après propagation, il faut développer de nouveaux dispositifs non-linéaires capables de réaliser des fonctions de discrimination ou de limitation optique, basés sur la saturation d'absorption ultra-rapide, l'indice non-linéaire ou les effets non-linéaires paramétriques. Au troisième niveau, la re-synchronisation tout-optique nécessite de développer des schémas de récupération d'horloge à très haute cadence, par exemple au moyen de sources lasers pulsées synchronisables optiquement. Les différentes solutions proposées pour la régénération optique doivent intégrer l'exigence de compatibilité avec le mode de transmission WDM. Il faut donc privilégier les solutions qui permettent la régénération simultanée de plusieurs canaux de longueurs d'onde différentes. Par ailleurs, il est nécessaire de corriger la dispersion introduite par les fibres. Des solutions existent à base de fibres compensatrices, mais elles sont encombrantes et coûteuses. Des solutions compactes sont à l'étude : l'ingénierie de la dispersion que permettent les cristaux photoniques suscite un engouement particulier à cette fin. De plus les problèmes de dispersion de polarisation deviennent très pénalisants à partir de 160 Gbit/s par canal. Il convient donc de rechercher des solutions à ce problème, par exemple au moyen de fibres particulières ou par des contrôles de polarisation en ligne.

### **Réception**

À des débits supérieurs à une dizaine de Gbit/s, l'électronique de détection constitue souvent un goulet d'étranglement et il faut envisager de nouvelles méthodes de détection, basées notamment sur des phénomènes optiques non-linéaires. Les portes optiques ultra-rapides permettent en effet d'effectuer un démultiplexage temporel des signaux optiques, les ramenant ainsi à un débit compatible avec l'électronique. Il est donc important de développer des dispositifs non-linéaires efficaces pouvant agir comme porte optique ultra-rapide. Au-delà des études sur les dispositifs innovants, il est nécessaire de

pouvoir tester leur comportement en situation d'utilisation réelle. C'est pourquoi il apparaît primordial dans ce contexte de développer des études systèmes et il serait très utile pour la recherche dans ce domaine de développer des plates-formes d'expérimentation de nouveaux composants sur des prototypes de ligne de transmission à très haut débit.

## Routage tout-optique

Si le domaine des transmissions à longue distance constitue le premier exemple où le tout-optique a montré son efficacité, le routage tout-optique semble bien constituer logiquement l'étape suivante dans l'évolution des réseaux vers de plus hautes performances. Est-il réaliste d'envisager l'abolition totale des conversions optique / électronique / optique dans le réseau ? Le débat est ouvert, mais beaucoup pensent que ce n'est probablement qu'une question de temps. En tout cas les points durs sont maintenant bien identifiés :

Les traitements logiques optiques, en dehors de certaines démonstrations de principe, restent encore à un stade embryonnaire. Là encore les dispositifs optiques non-linéaires peuvent apporter des solutions intéressantes, même si leurs performances actuelles laissent encore à désirer.

La mémoire RAM optique est un composant qui fait cruellement défaut. Il serait pourtant essentiel de développer des solutions viables à ce problème, afin de pouvoir résoudre les problèmes de contention, par un stockage temporaire des données au nœud du réseau lorsque une liaison n'est pas disponible.

Malgré ces difficultés la tendance observée actuellement dans l'évolution des réseaux consiste en une approche intermédiaire, qui consiste à rester en mode optique tant qu'il n'est pas nécessaire d'analyser la nature individuelle des éléments binaires. On aboutit alors à la notion de routage optique « transparent » (transparent au contenu informationnel), quitte à ce que les signaux de supervision acheminés par voie optique fassent l'objet, aux nœuds du

réseau, d'un traitement numérique local par voie électronique.

Dans ce domaine on peut identifier plusieurs voies de recherche intéressantes :

- dispositifs sélectifs et accordables en longueur d'onde pour systèmes WDM : sources laser, filtres et autres dispositifs de type OADM (Optical Add Drop Multiplexer). L'approche MOEMS pour les dispositifs accordables constitue une voie prometteuse, pour les applications où la vitesse n'est pas excessive, comme par exemple la reconfiguration ;

- cross-connect optique (OXC) : Les composants de commutation spatiale NxN font aussi l'objet d'une intense R&D, avec en particulier les solutions développées par Lucent à base de matrices de miroirs pivotants, ou le système à bulles de Agilent. De nombreux problèmes restent posés, s'agissant de la fiabilité, des pertes d'insertion. Des solutions compactes sont très recherchées : tout reste ouvert, même pour des dispositifs de base 2x2. De nouvelles approches pour la « circuiterie photonique » comme celles basées sur les structures à bande interdite photonique, paraissent très prometteuses à l'heure actuelle ;

- conversion de longueur d'onde : il s'agit d'un enjeu de taille pour les communications optiques, pour la gestion des canaux WDM. Le développement de convertisseurs plus performants implique la mise au point de dispositifs optiques non linéaires très rapides. Des solutions à base de cristaux photoniques, intégrant des matériaux non-linéaires, mobilisent également l'intérêt des chercheurs ;

- amplificateurs régénérateurs : les pertes et les distorsions inévitables introduites par les composants de commutation spatiale doivent pouvoir être compensées par des amplificateurs régénérateurs. Le problème est similaire à celui des transmissions à longue distance, avec des exigences supplémentaires en compacité et degré d'intégration. Les solutions paraissent devoir être recherchées du côté des guides optiques dopés aux terres rares, des amplificateurs optiques à semiconducteurs, et des amplificateurs paramétriques à ondes guidées.

## Les interfaces de l'optique

Le réseau tout-optique a vocation à pénétrer jusque chez les consommateurs de services de communication, éventuellement jusque dans leurs terminaux, pour qu'ils puissent bénéficier de débits d'information très élevés. Cette perspective continue d'être envisageable à long terme, mais le réseau de transport restera prolongé à moyen terme par un réseau d'accès mettant en œuvre un ensemble diversifié de solutions, aujourd'hui moins coûteuses et permettant de mieux rentabiliser les infrastructures existantes telles que les réseaux filaires ou câblés.

La frontière entre le tout-optique et l'électronique se déplacera ainsi dans le temps vers le client, mais aussi en fonction des techniques utilisées dans le réseau d'accès. Parmi celles-ci, les radiocommunications offrent de grandes facilités de déploiement ainsi que des avantages de mobilité. Elles requièrent une gestion très rigoureuse des fréquences disponibles, celles-ci dépendant elles-mêmes de l'état d'avancement des techniques. À cet égard, le domaine millimétrique commence à être exploité, car il offre de larges plages spectrales libres bien adaptées à la mise en œuvre de hauts débits. Ainsi, les premiers systèmes point à multipoint de boucle locale radio dans la bande 27.5-29.5 GHz sont en cours de déploiement en France, dans la même perspective l'Europe recommande la bande 40.5-43.5 GHz pour la distribution multipoint de vidéo, et l'étude des architectures de type radio sur la fibre est menée dans la bande 57-59 GHz pour des applications intra-bâtiments.

Ces systèmes, et leurs extensions éventuelles à des bandes de fréquences plus élevées, réclament des composants et des circuits millimétriques performants et de bas coût, mais aussi des composants optiques-millimétriques spécifiques pour l'émission, la réception ou le traitement de signaux optiques eux-mêmes support de signaux millimétriques en bande étroite au voisinage des fréquences de porteuse radio. Deux voies de mise en œuvre de l'interaction optique-millimétrique sont alors à considérer : la modulation directe

ou le battement entre longueurs d'ondes, la seconde solution étant plus robuste relativement aux problèmes de dispersion chromatique dans la propagation. Si ces différentes approches peuvent d'ores et déjà contribuer à l'évolution du réseau d'accès, il est clair que la structure du réseau optique conditionne largement leur conception. Par contre, elles impactent fortement les équipements situés chez le client ou dans son voisinage immédiat.

## 3.2 SÉCURISATION DE L'INFORMATION

L'évolution de la société vers un monde de communications s'accompagnera d'une forte demande de sécurisation de l'information dans les réseaux de télécommunications optiques et radiofréquences. Parallèlement à la sécurisation au moyen du cryptage par algorithmes informatiques, d'autres techniques sont à explorer et évaluer, notamment lorsqu'il s'agit de sécuriser des débits d'information très élevés (>> 100 Mbit/s).

### Cryptographie quantique

Ce domaine de recherche, très nouveau, est une des composantes du thème général de l'information et communication quantique, qui tire parti de la mécanique quantique pour traiter l'information de manière plus efficace. Forts de la constatation qu'un algorithme considéré comme inviolable à un moment donné s'est toujours révélé cassable à la suite des progrès dans la théorie des nombres, les défenseurs de cette approche font valoir qu'il vaut mieux s'appuyer sur un principe physique inviolable. En effet un algorithme quantique introduit par Peter Shor en 1994 permet de factoriser des grands nombres en un temps exponentiellement plus court que les algorithmes classiques, remettant ainsi en cause la confidentialité des systèmes de cryptographie actuels. De grandes entreprises comme IBM ou

Lucent considèrent en fait l'information quantique comme un candidat à examiner sérieusement pour l'après-silicium, et y consacrent des moyens importants : les enjeux économiques de l'information quantique concernent donc non seulement les communications sécurisées, mais aussi de façon plus large l'étude de systèmes physiques manipulant l'information à l'échelle atomique.

Le cryptage quantique concerne la distribution de clés de cryptage par fibre optique et la confidentialité est, en principe, infinie puisque garantie par le principe d'incertitude de Heisenberg : toute mesure sur un photon détruit l'état quantique sur lequel il se trouve. L'état de l'art international en est au stade des premières démonstrations de principe, où diverses instabilités limitent les durées de transmission à quelques secondes. Les méthodes de codage en phase s'appuyant sur les technologies télécoms apparaissent prometteuses pour améliorer cet aspect. Par ailleurs il est indispensable d'améliorer les composants d'extrémité, pour aller vers de véritables émetteurs de photons uniques (nanosources à un photon), et des composants de détection de très bas flux lumineux dans les fenêtres spectrales des télécommunications, présentant un rendement quantique élevé tout en ayant des courants d'obscurité très bas. De plus des codes correcteurs d'erreurs particuliers sont à développer, pour tenir compte des spécificités de ces nouvelles méthodes de cryptage. Des synergies sont à rechercher avec des équipes spécialistes de la cryptographie algorithmique et des radiocommunications pour étendre de façon mutuelle les compétences.

## Cryptographie par le chaos

Ce principe repose sur les dynamiques chaotiques appliquées au traitement de signal pour la génération de codes de chiffrement ou de code CDMA. Contrairement au cas du cryptage quantique, la sécurisation est effectuée par le biais d'algorithmes mathématiques, dont l'implémentation est réalisée par voie matérielle et non logicielle, ce qui permet de traiter les

données à très haut débit. Dans ce domaine il semble important de mettre en œuvre des phénomènes chaotiques de très grande dimensionalité, qui peuvent être appliqués non seulement aux transmissions optiques mais aussi au domaine des hyperfréquences.

Cet axe de recherche paraît novateur à la fois sur le plan scientifique et sur le plan des applications aux technologies de l'information. Plusieurs aspects sont à considérer :

- du point de vue propriétés mathématiques : études des dynamiques chaotiques régies par des équations non-linéaires à retard (particulièrement celles de très grande dimension) et de leurs propriétés statistiques, relation entre la complexité du chaos (au sens du nombre d'exposants de Lyapunov) et le degré de sécurité (au sens de la théorie de l'information). Cet aspect relève de la cryptanalyse et nécessite l'implication d'informaticiens cryptologues pour l'étude d'attaques informatiques ;

- du point de vue physique : conditions de synchronisation de deux hyperchaos, génération de dynamiques non-linéaires ultra-rapides, influence du bruit du canal de transmission, influence du bruit d'échantillonnage dans la génération de chaos numérique ;

- du point de vue système : étude d'un système de cryptographie adapté à la transmission de signaux numériques par porteuses chaotiques, étude de la confidentialité, évaluation de la résistance aux attaques.

Enfin la cryptographie par chaos peut être étendue aux radiocommunications. Sur ce point il conviendrait de tester le degré de confidentialité apporté par une porteuse radiofréquence hyperchaotique, et la possibilité de générer des clés de cryptage et de codes CDMA par chaos.

### 3.3 RELATION ENTRE LES ASPECTS MATÉRIELS ET LOGICIELS

Si le présent rapport est centré sur l'évolution des technologies matérielles, n'oublions pas que les technologies logicielles ont aussi un impact considérable sur les performances des réseaux de télécommunication. L'exemple récent le plus évident, dans le domaine des protocoles de communication, est la montée en puissance d'Internet. Le protocole IP, qui permet une signalisation et un routage optimisés, devient maintenant incontournable, et justement son développement a fortement stimulé la demande d'une capacité de transmission accrue dans les réseaux.

À ce stade, il faut noter que la recherche d'une meilleure efficacité globale des réseaux passe par une meilleure prise en compte de la relation entre les aspects matériels et les aspects logiciels. Alors que traditionnellement l'architecture des réseaux est décrite en terme de « couche logicielle » et de « couche matérielle » bien distinctes, cette séparation est en train de s'estomper, puisque des solutions nouvelles basées sur le mariage de l'IP et de l'optique sont étudiées activement. Ces solutions « IP optique » prennent en compte les spécificités du WDM au niveau du protocole de signalisation, en manipulant les longueurs d'onde en guise de labels. Elles doivent permettre des améliorations de flexibilité et de fiabilité dans les réseaux optiques à haut débit, en particulier pour pouvoir les reconfigurer de manière purement logicielle.

Terminons par une dernière remarque : si la demande de réseaux toujours plus performants stimule la recherche, pour aboutir à des technologies toujours plus efficaces, en retour l'augmentation de la performance des réseaux donne de nouveaux moyens à la recherche elle-même : citons comme simple exemple le domaine du calcul scientifique, pour lequel l'utilisation d'ordinateurs fortement couplés par des interconnexions optiques à travers le réseau devrait augmenter de manière considérable la puissance de calcul disponible. L'idée ne date pas d'hier, mais il y a ici un élément nouveau apporté par des débits de transmission fortement accrus.

## 4 – NANOÉLECTRONIQUE ET NANOPHOTONIQUE

*Mots clés :*

*matériaux, structures et effets physiques ;*

*nanocomposants électroniques et photoniques (blocage de Coulomb, électronique à un électron, composants Si et III-V ultimes, microcavité, BIP, électronique de spin, électronique moléculaire), information et cryptage quantique ;*

*plateformes technologiques.*

La nanophotonique et la nanoélectronique posent trois types d'enjeux :

- effets physiques mis en jeu à l'échelle macro- ou microscopique et le couplage entre ces effets ;

- réalisation des objets associés à la nanophotonique et nanoélectronique : matériaux en couche ultramince ou auto-organisés, micro et nanotechnologies, simulation prenant en compte le caractère quantique lié au confinement, conception intégrant nanotechnologies et propriétés liées au confinement, observation directe ou indirecte des objets, métrologie, techniques expérimentales à mettre en œuvre ;

- accès aux structures nanométriques, couplage au monde extérieur, utilisation éventuelle en termes de fonction : amélioration de fonctions existantes, création de nouvelles fonctions, insertion d'une fonction dans un système existant ou à créer, modélisation globale incluant les aspects liés aux circuits ou aux systèmes d'application, etc.

Ainsi la physique et la technologie des nanostructures doivent être abordées au sein de notre communauté en les analysant, dans la mesure du possible, au sein d'une approche composant et même systémique. Tous ces enjeux ouvrent des perspectives de recherche dans des domaines très variés. Il existe, en outre, des relations étroites avec des domaines déjà en fort développement qui souvent, utilisent des structures largement

submicroniques : les réflecteurs de Bragg distribués et les microcavités, par exemple, sont des structures périodiques submicroniques qui, associées à des puits quantiques nanométriques, ont conduit à des réalisations marquantes comme les diodes laser DFB ou DBR des télécommunications ou les VCSEL. De même, les transistors CMOS et les circuits hyperfréquences III-V voient leur performances ou leur densité augmenter régulièrement au sein d'une même filière technologique par une réduction régulière de leur dimension.

## 4.1 MICRO ET NANOSTRUCTURES, COMPOSANTS ET APPLICATIONS

### Nanophotonique

Les nanostructures photoniques ouvrent un large champ de recherches : On peut, de façon arbitraire, séparer tout d'abord les effets « purement » électromagnétiques : structures et matériaux à bande interdite photonique, ou effets liés aux ondes évanescentes dans des structures périodiques ou non mais avec des dimensions typiques inférieures à la longueur d'onde, et considérer ensuite les structures dans lesquelles ces effets sont couplés à des processus électroniques (souvent dans des structures de faibles dimensions comme puits, fils et boîtes quantiques), ou de l'optique non-linéaire ou d'autres encore (piézoélectriques, mécaniques, électrostatiques). On a alors affaire généralement à des structures où la propagation de la lumière joue un rôle important : guides d'onde et cavités verticales, actifs ou passifs, linéaires ou non-linéaires.

• **Structures à bande photonique interdite 3D** : recherches sur les matériaux et technologies de réalisation, développement de méthodes expérimentales et d'outils théoriques, résolution des équations de Maxwell et méthodes approchées, comparaison théorie-expérience, etc.

• **Structures à bande photonique interdite 2D** : réalisation de guides d'onde intégrés ou fibrés, évaluation des pertes, optique non-linéaire dans ces milieux, caractérisation physique des structures, mesures et modifications locales par des techniques de champ proche, applications au contrôle de la dispersion, à la commutation, l'adressage, au multiplexage en longueur d'onde, manipulation et modification de faisceaux. Faisabilité de dispositifs regroupant plusieurs fonctions élémentaires. Guides actifs intégrés ou fibrés, à semiconducteurs, ou diélectriques dopés aux terres rares : structuration spatio-temporelle des milieux à gain distribué avec des éléments gravés 1D ou 2D, etc.

• **Structures sub-longueur d'onde gravées** : composants diffractifs à fort rapport d'aspect, guides segmentés, composants à effet tunnel optique, génération, propagation et détection du champ évanescent, etc.

• **Nanolasers, nanodétecteurs** : lasers à cavité verticale ou à émission latérale associés à des puits, fils ou boîtes quantiques, réduction des dimensions de la zone active, problèmes d'injection, association à d'autres fonctions optiques, mécaniques, etc. (absorbants saturables, déformation électrostatique de la cavité, etc.) pour obtenir l'accordabilité, la génération d'impulsions courtes, etc. Augmentation du couplage avec des boîtes quantiques et utilisation de celles-ci pour augmenter le domaine spectral couvert par les alliages semiconducteurs disponibles : vers le visible (lecture/écriture, fibres polymères), dans l'infrarouge proche de 0.8 à 1.7  $\mu\text{m}$  pour les communications par fibre de silice, dans l'infrarouge moyen pour la détection, etc.

Les domaines d'application concernés sont évidemment très divers, à commencer par ceux où la pénétration de l'optique et de l'optoélectronique est en forte augmentation : lecture/écriture pour le stockage de l'information et la visualisation, capteurs biologiques ou chimiques dans les microlaboratoires intégrés, liaisons optiques pour la communication de données dans les systèmes informatiques multiprocesseurs ou

répartis, télécommunications haut débit dans la bande élargie des fibres optiques en silice, association aux dispositifs microélectroniques pour la génération/détection hyperfréquence ou THz, etc. Le domaine de la cryptographie mérite une attention particulière. Enfin, des nouveaux domaines apparaissent, tels le calcul et la cryptographie quantiques. Ces derniers domaines de recherche très ouverts constituent des défis physiques et technologiques et méritent une certaine maturation au sein des laboratoires SPM et STIC avant d'aborder la réalisation de composants et un stade plus systémique.

## Nanoélectronique

Les transistors de type C-MOS sur Si sont au cœur de la micro/nanoélectronique. L'augmentation de l'intégration de circuits intégrés et de la taille de la grille d'un transistor sont bien décrites par la loi de Moore pour les quinze années qui suivent. Néanmoins la roadmap identifie un certain nombre de verrous technologiques et de problèmes qu'il ne faut pas mésestimer : phénomènes quantiques, effets de canal ultra-court, fluctuations électriques spatiales et temporelles, courants tunnels, diffusion des dopants, etc. et, coût des installations.

La solution des problèmes précédents risque cependant de ne pas suffire pour permettre un fonctionnement correct aux longueurs de grille inférieures à 50-70 nm. Il est donc intéressant d'étudier des solutions architecturales de rupture. Les structures à blocage de Coulomb et l'électronique dite « à 1 électron » constituent une solution, qui concerne cependant le très long terme, avec des dimensions caractéristiques de l'ordre de quelques nanomètres. Entre l'architecture MOS « classique » et ce type de solution, un certain nombre de technologies de rupture qui devraient permettre d'obtenir un fonctionnement de type MOS avec des dimensions de canal de l'ordre de 10-30 nm :

- structures verticales permettant le contrôle des dimensions de canal par épitaxie ;

- étude et optimisation des performances de composants innovants : MOS/SOI double grille à inversion volumique, MOS vertical, MOS/SOI à plan de masse, MOS/SOI à couche de Si nanométrique, etc. ;

- recherche de haute mobilité (canaux contraints, contacts injectants, etc.) ;

- architectures permettant de réduire les résistances d'accès.

Ces structures sont très loin de la maturité pour des problèmes de réalisation technologique mais constituent un vecteur fondamental pour les études physiques concernant les très petites dimensions.

Dans les composants ultimes qui pourraient intervenir dans l'ère plus futuriste de la nanoélectronique post-CMOS, les tentatives d'utiliser les effets de blocage de Coulomb pour faire des dispositifs (transistor ou mémoire à un électron, transistor à nodule de Si) se heurtent actuellement aux problèmes de la température et des charges d'offset. Les aspects composants à un électron doivent être dédiés à la compréhension des phénomènes monoélectroniques dans la perspective d'une miniaturisation accrue.

Dans le domaine des communications ultra hauts débits, il faut préparer les briques de base des futurs systèmes de transmissions à 80 Gbits/s et 160 Gbits/s et des échantillonneurs térahertz. Ces développements ne seront possibles que si on dispose de composants microélectroniques capables de travailler dans le domaine THz/pS. L'amélioration des composants actuels peut s'obtenir par « simple » réduction des dimensions de la zone active des composants actifs « conventionnels » HEMTs et HBTs. Par contre, une amélioration significative des performances ne pourra s'obtenir à long terme que par une rupture technologique, et s'adresse donc au plus long terme (10 > ans). De nombreuses idées de dispositifs nouveaux ont été proposées (transistors à un électron, diodes à effet tunnel résonant intégrée avec un HEMT, composants à interférences quantiques, composants à électronique de spin, électronique moléculaire) et méritent d'être approfondies.

Pour atteindre les communications à haut débit (80 et 160 Gbits/s) dans les circuits micro-ondes de puissance il faut inventer des composants à très forte montée en fréquence (500 GHz). Cet objectif nécessitera de pousser dans leurs retranchements les technologies des transistors à base de GaInAs avec d'une part une réduction des dimensions à des échelles inférieures à 0.1  $\mu\text{m}$  et d'autre part le développement de nouvelles technologies pour la tenue en tension et la montée en fréquence. D'autres applications tels les radars nécessitent de fortes puissances à des fréquences plus modestes (environ 10 GHz). Aujourd'hui les semi-conducteurs à base de nitrures d'éléments III (GaN) permettent d'envisager une révolution dans le domaine des circuits de puissance avec une multiplication par 10 des puissances fournies. Les points durs vont du matériau à la réalisation des circuits (problèmes thermiques, technologies des composants) et nécessiteront un effort très important en raison de la nouveauté de ces matériaux pour ces applications.

L'enregistrement magnétique a démontré depuis de nombreuses années ses potentialités pour l'enregistrement de masse. Le développement des applications mobiles (téléphone, photo et vidéo, ordinateurs, véhicules intelligents, etc.) provoque une diversification des besoins et des applications et met au premier rang les problèmes d'encombrement et de consommation d'énergie. L'enregistrement magnétique est bien adapté aux nouvelles applications mobiles. Le disque dur est déjà entré depuis longtemps dans le monde des nanotechnologies. La taille d'un bit d'enregistrement devrait atteindre  $40 \times 100 \text{ nm}^2$  en 2002 et la notion d'une nanostructure-un bit commence à émerger. À ces dimensions, il devient par ailleurs indispensable d'introduire des dispositifs microsystèmes (MEMS) pour le pilotage de la tête de lecture et le suivi de piste. Outre les systèmes à magnétorésistance géante qui ont déjà des applications pour les têtes magnétiques, les systèmes à magnétorésistance tunnel sont très prometteurs avec l'émergence d'une nouvelle technologie MRAM. Cette nouvelle technologie allie non

volatilité, économie d'énergie, insensibilité aux radiations tout en gardant une grande rapidité de lecture/écriture comparable à celle des mémoires RAM semiconductrices. L'injection de spin qui permet de retourner l'aimantation par un courant électrique rend standard la commande de ces dispositifs. Par ailleurs, la combinaison des effets de spin et blocage de Coulomb pourrait conduire à des systèmes qui lèveront le verrou de la température dans les systèmes à un électron.

## 4.2 MATÉRIAUX, MICRO ET NANOTECHNOLOGIES

En ce qui concerne les matériaux, il semble logique de considérer que les hétérostructures à semiconducteur, et notamment III-V, joueront un rôle de premier plan pour la nanophotonique car elles sont à la base du développement actuel de l'optoélectronique et de l'optique intégrée. Ces matériaux bénéficient de technologies bien établies qui s'orientent naturellement vers la réalisation de structures nanométriques. En particulier, les efforts sur les technologies d'épitaxie, qui ont à leur actif la réalisation de puits quantiques, guides d'onde, cavités verticales et des dispositifs dérivés, devront se poursuivre sur les structures auto-organisées, par le contrôle de cette organisation ou l'association avec des technologies spécifiques de structuration de surfaces ou de volume : marquage des sites de nucléation, mais aussi gravure fine ou autres techniques permettant d'incorporer des éléments diffractifs, des cristaux photoniques 2D ou 3D pendant ou après la croissance des hétérostructures, en faisant intervenir les contrastes d'indice offerts par les différents alliages. L'élaboration de nouveaux matériaux concernent également la nanoélectronique hyperfréquences ou MOS : alliages IV-IV, diélectriques à forte permittivité, etc. L'élaboration d'oxydes nanométriques de grande qualité :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  constitue un défi pour la réalisation de transistor ultime dans la technologie C-MOS ou de composants à

électronique de spin. Par ailleurs, le contrôle de la croissance de nodules de Si ou métalliques avec éventuellement auto-organisation latérale ou verticale est indispensable pour les mémoires à nodules de Si, à nano-pièges ou utilisant l'électronique de spin.

Le niveau de développement de la technologie électronique basée sur le silicium doit également inciter à rechercher la réalisation de fonctions optiques tirant parti de ces possibilités ou facilement associables aux fonctions de la microélectronique, la question essentielle étant ici la compatibilité, excessivement contraignante (aussi bien en termes de technologie que d'architecture). Les nanostructures de silicium pourraient constituer des émetteurs de lumières intégrables à la microélectronique. Cette voie de recherche mérite d'être approfondie en association avec une véritable plateforme microphotonique tout optique sur silicium ou SOI intégrant également les matériaux à gap photonique.

D'autres matériaux devront aussi être pris en considération, soit par leur intérêt pour mettre en œuvre un effet physique recherché (par exemple, pour le couplage photon-exciton fort), soit par les perspectives qu'ils ouvrent pour changer la situation technologique. Les thématiques liées aux matériaux moléculaires (nanotubes, famille des naphthalènes et fullérènes) et aux matériaux supraconducteurs ont émergé pour certaines depuis une bonne dizaine d'années. Leurs perspectives en Sciences et Technologies de l'Information et Communication nécessitent encore la mise en place d'actions pluridisciplinaires avec les départements Chimie et SPM dans le cadre d'actions à long terme.

À ces techniques d'élaboration de matériaux devront être associées les nanotechnologies permettant la structuration latérale et verticale à l'échelle nanométrique : écriture par faisceau électronique, nouvelles sources UV ou X dans le domaine 10-50 nm, techniques de gravure plasma ou ionique conduisant à l'amélioration des bords verticaux des structures à microcavités ou MOS vertical. L'utilisation croissante de techniques de répli-

cation potentiellement plus simples comme la nano-impression est à développer avec les techniques de visualisation en champ proche éventuellement associées. Ainsi, dans une recherche nanocomposant, le rôle national des grandes centrales de technologies (IEMN, IEF, LAAS, LPN, PLATO, etc.) est essentiel. Ce développement de la nanotechnologie doit également s'appuyer sur des équipements performants délocalisés (SEM pour lithographie électronique, microscopie champ proche, etc.) permettant la réalisation et le contrôle de la nanostructuration ainsi que l'accès aux propriétés physiques du nanocomposant.

### **4.3 OBSERVATION DES NANO-OBJETS, OUTILS NANOMÉTRIQUES, MÉTROLOGIE**

Le plus souvent l'étude des nanoobjets est réalisée de façon indirecte au travers d'un effet physique ou d'une fonction globale. Les techniques d'observation « directes » devront être développées, qu'il s'agisse de la caractérisation des ondes interagissant avec des structures périodiques pour la nanophotonique (interférométrie) ou de techniques locales cherchant à augmenter la résolution spatiale (ensemble des techniques de champ proche qui sont actuellement déjà très diversifiées et dont l'utilisation semble destinée à se développer et encore se diversifier ou à combiner les différentes fonctionnalités).

Il faut rappeler que ce type de développement a souvent conduit, dans d'autres domaines, à une amélioration de la compréhension mais aussi à la transformation des outils d'observation en moyens de réalisation ou d'accès aux structures d'intérêt. On peut penser que les sondes nanométriques (leviers, poutres, pointes, etc.) avec des fonctionnalités étendues au-delà de l'optique et de l'électronique, si elles deviennent compactes, rapides, parallèles, etc. pourront remplir ces rôles.

## 4.4 ACCÈS AUX STRUCTURES NANOMÉTRIQUES, COUPLAGE AU MONDE MACRO- ET MICROSCOPIQUE

Ce problème se pose déjà souvent au stade des études, mais il est inévitable dès que l'on envisage l'utilisation de telles structures et doit toujours être présent à l'esprit.

La question se pose en termes d'électrodes pour l'application d'un champ ou l'injection de porteurs dans les dispositifs nanoélectroniques ou optoélectroniques tels que modulateurs, lasers, photodétecteurs, etc. Elle se pose aussi en termes de manipulation d'un faisceau lumineux devant interagir avec la structure nanométrique. Les guides d'onde et les cavités verticales sont les principaux outils disponibles pour confiner la lumière dans un milieu matériel et augmenter l'interaction avec celui-ci dans un volume réduit. Pour caractériser le transport électronique au sein d'une nanostructure, on peut envisager les techniques de champ proche combinant AFM et STM, les techniques permettent une mesure extrêmement sensible et localisée des potentiels à basse température : SET à l'extrémité d'un AFM, matrice de SET déposée sur un gaz d'électron enterré, etc.

À plus long terme, les outils dérivés de la microscopie en champ proche pourraient devenir utilisables pour l'adressage ou la lecture locales. Ce sont donc des techniques essentielles pour analyser les nanostructures. Elles devraient augmenter leur potentialité en utilisant le parallélisme et en généralisant l'utilisation d'actuateurs micromécaniques.

## 4.5 MODÉLISATION, SIMULATION

Le besoin d'outils numériques pour simuler et concevoir est ici très large et varié. Il concerne les aspects technologiques à un niveau atomique : processus d'auto-organisation, sélectivité des surfaces, processus de

gravure ultrafine. Également sont concernés les structures électroniques dans les systèmes de basse dimensionnalité et les interactions avec les ondes électromagnétiques, la propagation dans les milieux périodiques à échelle nanométrique, le transport électronique ballistique au sein des nanostructures en tenant éventuellement compte du spin, etc.

L'objectif est de comprendre les mécanismes mis en jeu en incluant les phénomènes quantiques ou de confinement au sein des nanostructures. Par ailleurs, les simulations doivent être réalisées dans des structures réelles où les objets simulés ne sont pas idéaux et correspondent plutôt aux possibilités de la technologie disponible.

L'intégration de ces outils numériques dans des logiciels de simulation de dispositifs plus complexes doit également être envisagée : association d'effets à l'échelle micro et nanométrique, couplage à des effets macroscopiques, etc. L'objectif est de disposer d'outils de conception avancés permettant de prévoir le comportement global et les performances des composants. Enfin, on doit prendre en compte l'intégration dans un circuit ou dans un système pour situer les enjeux et les contraintes.

# 5 – ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET ACOUSTIQUES

*Mots clés :*

*modélisation et méthodes numériques, diffraction et propagation, mathématiques appliquées, structures à BIPs et milieux complexes, diffraction inverse, imagerie et optimisation, optique et acoustique en champ proche, antennes dispositifs hyperfréquence et radars, interaction ondes-matière et ondes-structures biologiques, ondes gravitationnelles.*

Les pages qui suivent s'appuient sur une enquête menée auprès d'une soixantaine de chercheurs et laboratoires représentatifs de la communauté scientifique nationale des ondes électromagnétiques et acoustiques (une trentaine ont répondu). Le rapport est divisé en paragraphes traitant des différentes disciplines, dont la plupart font également partie d'autres thèmes transversaux, voire d'autres départements scientifiques, et sont souvent considérées dans d'autres Grands Organismes.

Le Groupe de Réflexion Thématique « Ondes électromagnétiques et acoustiques » souligne des insuffisances certaines dans un contexte de concurrence croissante où, au-delà des USA, des pays tels que le Japon accomplissent de spectaculaires progrès. Il est nécessaire de réhabiliter l'électromagnétisme et l'acoustique fondamentaux si l'on veut éviter qu'ils n'entrent « en voie d'extinction » dans notre pays, pénalisant fortement nombre des travaux ci-après dont ils constituent très souvent un pré-requis. Le progrès de ces disciplines fondamentales ne peut être sérieusement envisagé sans une étroite collaboration avec les mathématiciens. Cette remarque ne signifie nullement que les activités en technologie, fabrication et caractérisation ne nécessitent aucun effort de promotion. Dans un domaine bénéficiant d'un fort environnement industriel, celles-ci sont absolument essentielles au maintien de la recherche nationale au plus haut niveau.

## **MODÉLISATION ET MÉTHODES NUMÉRIQUES**

La communauté nationale est, à des degrés divers, plutôt bien placée sur le terrain des méthodes classiques de résolution des problèmes de diffraction : méthodes intégrales, éléments finis, différences finies, FDTD, méthodes différentielles etc. Elle devrait toutefois (et cette remarque s'étend à nos concurrents étrangers) faire porter un effort plus soutenu sur les performantes méthodes modales et analytiques, exploitant la simplicité

de la forme des objets (rayonnants, diffractants) et/ou des environnements, ainsi que sur les méthodes hybrides et multi-échelles.

Plusieurs verrous se présentent. Pour les lever, il faut éviter le « tout numérique » et favoriser une approche exigeante basée sur la compréhension physique du problème et l'usage intensif des mathématiques appliquées. Parmi ces verrous, il faut citer le traitement de la diffraction par des structures 2D et surtout 3D de géométries complexes (e.g., collection périodique, quasi-périodique, désordonnée ou fractale d'objets ou de rugosités d'interface), composées de matériaux complexes traditionnels (e.g., anisotropes, magnétiques, dispersifs, etc.) et/ou faisant coexister des éléments de grandes tailles et de petites tailles par rapport à la longueur d'onde (un même verrou apparaît lorsque des sources et circuits sont considérés). Si l'on excepte les méthodes asymptotiques pour les faibles longueurs d'onde (GTD par exemple) assez bien développées au plan national, deux approches (éventuellement complémentaires) sont présentes. La première revêt un caractère numérique et concerne la manipulation efficace de matrices de grande taille résultant d'une discrétisation opportune du phénomène d'interaction. La seconde implique de rechercher les formalismes les mieux adaptés à cette interaction, la solution numérique en procédant. Dans cette seconde catégorie, la communauté nationale semble beaucoup moins nombreuse que celle d'outre Atlantique et les proportions n'évoluent pas en notre faveur. La résolution de certains de ces problèmes devrait bénéficier de collaborations avec les spécialistes de traitement d'images et du signal ou de spécialistes des phénomènes statistiques. Un effort doit être porté sur les méthodes hybrides ou multi-échelles, ainsi que sur la propagation et la diffraction multiple dans des structures aléatoires ou modélisées ainsi, au sein des milieux ou à leurs interfaces (diffraction par des éléments naturels d'un sous-sol, d'un océan ou d'une atmosphère, couverture végétale et agricole, propagation micro-onde dans les milieux urbains). Comme nous

le verrons par la suite, les effets non-linéaires dans les systèmes complexes, périodiques, quasi-périodiques ou désordonnés représentent un enjeu capital et demandent un effort de modélisation. Il faut enfin favoriser la réflexion phénoménologique qui permet, par usage des logiciels, d'interpréter les résultats, de découvrir de nouveaux phénomènes et quelquefois de simplifier les logiciels.

## **6 – DIFFRACTION ET PROPAGATION**

La théorie classique de la propagation et de la diffraction des ondes acoustiques et électromagnétiques repose sur les mêmes bases à savoir la description d'un champ et la prescription de sources.

Les progrès en nanotechnologie offrent de réelles perspectives dans le domaine de l'optique diffractive. Cette dernière couvre un vaste domaine spectral allant des rayons X à l'infrarouge thermique et s'impose dans des domaines scientifiques et techniques de plus en plus variés. Les fonctionnalités recherchées sont nombreuses et l'aspect matériau, au travers de composants programmables, prend une importance grandissante. Ces fonctionnalités incluent l'imagerie, l'écriture et la lecture de l'information, le filtrage spatial ou spectral, le routage, la détection, l'émission etc. Si la communauté française est bien placée sur la scène internationale sur l'aspect modélisation, elle n'a que faiblement amorcé le virage de la fabrication. Pourtant à l'étranger, ce domaine est actif : par exemple, en Allemagne, lors de la conception du masqueur électronique LION, un effort spécifique a été apporté pour l'écriture de motifs courbes. Aux USA et en Suisse notamment, la réplique de motifs sub-microniques a fait l'objet d'importants financements, et Canon commercialise depuis peu un objectif hybride pour ses appareils photographiques.

L'émergence de nouvelles techniques d'imagerie non invasive en milieux diffus permettent d'obtenir des informations morphologiques et fonctionnelles parfois à haute résolution. Elles posent d'importants problèmes expérimentaux et théoriques. Dans ce domaine, les techniques d'imagerie polarimétrique ont montré leur grand intérêt et devraient poursuivre leur développement.

L'optique adaptative constitue une réponse intelligente à beaucoup de problèmes de l'optique et de l'astronomie, en définissant des contre-mesures extrêmement précises et efficaces destinées par exemple à pallier les dégradations des performances d'un instrument causées par son environnement de travail.

Les outils et méthodes de la microsonique devraient permettre la mise au point de systèmes novateurs d'imagerie acoustique. Les sondes utilisées pour l'émission-détection d'échos ultrasonores, ainsi que les nouveaux guides d'ondes élastiques pour les télécommunications (composants passifs de traitement du signal de type filtres, résonateurs, etc.) nécessitent non seulement le développement de modèles et outils théoriques, mais aussi la recherche de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de fabrication des guides d'ondes et des transducteurs ultra-sonores.

Enfin citons un problème d'envergure lié à la compréhension et à la modélisation de la densité d'états électromagnétiques en espace structuré ou confiné. La densité d'états commande l'interaction d'une antenne ou d'un atome avec son environnement, influe sur la directivité de l'émission, sur l'efficacité du couplage et sur la durée de vie de l'émetteur. Il est indispensable de modéliser correctement cette interaction pour développer des émetteurs, modulateurs ou récepteurs aux performances accrues.

## **6.1 STRUCTURES À BANDES INTERDITES PHOTONIQUES OU SONIQUES, MILIEUX COMPLEXES**

Apparu récemment, ce sujet a rapidement mobilisé plusieurs équipes de la communauté scientifique française rassemblées au sein du GDR « Cristaux photoniques et micro-cavités ». Aujourd'hui, ce groupe de laboratoires est reconnu comme le deuxième au monde après celui présent aux USA. Cette rapide évolution s'explique par l'intérêt qu'ont suscité chez nous les grandes applications potentielles de ces structures, notamment dans le domaine des télécoms et des antennes.

Plusieurs techniques de fabrication des cristaux se sont développées. Dans le domaine micro-ondes, les cristaux métalliques utilisés comme supports d'antennes ou comme antennes satellitaires, les cristaux reconfigurables, contenant éventuellement des éléments actifs et ceux utilisés pour des effets de filtrage ont été développés sur plusieurs sites nationaux et l'effort peut se limiter à maintenir l'effort des équipes actives. Tel n'est pas le cas dans le domaine optique. Si des techniques telles que le Silicium macro-poreux, les membranes à BIPs ou les guides enterrés pour l'optique intégrée sont présentes, d'autres types de structures BIPs 3D très importantes de type Yablonovite, structures « tas de bois » ou opales artificielles sont très récentes sur la scène nationale. La même remarque doit être faite pour les fibres optiques à cristaux photoniques qui sont pourtant susceptibles de trouver des applications à court terme. L'éclosion de nombreuses « start-up » dans le monde en constitue la preuve et il serait dommageable que la France prenne du retard dans ce domaine, d'autant plus qu'elle dispose en matière de modélisation des groupes les plus performants. La réalisation de circuits intégrés d'optique de dimensions compatibles avec celles de la microélectronique constitue une étape incontournable. Les progrès incontestables pour la réalisation des guides de lumière (membranes à BIPs ou guides enterrés) devraient être encouragés et s'étendre aux guides creusés dans les

cristaux, afin de résoudre le problème des pertes par courbure si préjudiciables à la miniaturisation. Par ailleurs, les micro-lasers de très faible seuil offrent la possibilité d'insertion de micro-sources. Les structures à BIPs (cristaux ou réseaux) devraient aussi permettre d'accéder à la demande pressante des communications optiques en matière de DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Un gros effort devrait aussi être porté sur l'usage des phénomènes non-linéaires et de matériaux actifs en vue de la réalisation de cristaux accordables optiquement. Les bandes interdites soniques (ou phononiques) semblent avoir suscité moins d'enthousiasme en acoustique, au moins en France. Pourtant, les applications pratiques ne sont pas moins enthousiasmantes, avec la possibilité de réaliser des barrières phoniques sélectives aussi bien en milieu marin que terrestre (protection des aéroports construits sur la mer contre les bruits sismiques par exemple).

Pour plusieurs milieux complexes « traditionnels » (supra-conducteurs, polymères conducteurs, films ferro-magnétiques, matériaux magnéto-optiques, etc.), de gros progrès ont été enregistrés récemment et pourraient conduire à des bouleversements technologiques. Cependant, une grande attention doit être accordée à l'explosion des structures composites « exotiques », actives ou passives, qui apportent à la science la perspective de simuler des matériaux que la nature ne nous a pas offerts. Les peaux électromagnétiques permettent ainsi d'obtenir une réponse commandée (telle à sélection d'angle, de fréquence, ou de polarisation) à une excitation électromagnétique, l'étude du comportement diffractant ou rayonnant de structures ainsi recouvertes étant aujourd'hui loin d'être conclue. La propriété d'ultra-réfraction (simulation d'un indice inférieur à l'unité) des cristaux photoniques en bord de gap a été démontrée expérimentalement et théoriquement mais plus récemment sont apparues pour des structures de même type des propriétés encore plus étranges telles que des indices optiques négatifs, des permittivités et/ou perméabilités négatives susceptibles de présenter un effet Doppler inversé. Il faut noter, dans ce cadre, les polémiques nées de la

proposition de J.B. Pendry d'utiliser les milieux « main gauche » pour élaborer des lentilles parfaitement stigmatiques. Il va de soi que la réalisation pratique de telles lentilles bouleverserait de nombreux domaines de l'optique, et en particulier les dispositifs de caractérisation optique en champ proche. Les milieux composites anisotropes biaxes suscitent à l'étranger de nombreuses études. Outre les profondes évolutions (voire révolutions) technologiques qu'ils nous préparent, ces matériaux posent de sérieux problèmes théoriques qui doivent être résolus. Ainsi la notion de milieu effectif est une notion asymptotique valide aux très grandes longueurs d'onde. Quel sens peut on lui donner quand ces dernières sont comparables à la dimension de la cellule élémentaire de la structure ? Qu'est un indice effectif quand celui-ci dépend de la direction de propagation de manière exotique (différente d'un matériau anisotrope traditionnel) ? La réponse à ces questions passe par une collaboration entre les spécialistes de ces structures et les mathématiciens spécialistes de la théorie de l'homogénéisation et de l'analyse limite. L'enjeu est une compréhension intime des phénomènes physiques et son lot de créativité associé.

## 7 – DIFFRACTION INVERSE, IMAGERIE, OPTIMISATION

Les problèmes inverses prennent leurs origines dans des applications pratiques d'importance économique, industrielle et sociale significative, qui incluent l'évaluation non destructive de structures artificielles et de matériaux, suivi de processus de fabrication industriels et contrôle de qualité, ingénierie biomédicale (dont ses fortes composantes d'imagerie, de thérapie, et de mesure de rayonnements et de contrôle de leurs effets), caractérisation de notre environnement au sens large (prospection minière et pétrolière, cartographie de ressources et de pollutions, génie civil, caractérisation

d'objets enfouis ou immergés, télédétection d'une structure de sol, d'un couvert végétal, de l'atmosphère) sans oublier les problèmes de source inverse, plus généralement de caractérisation d'une émission – électromagnétique, acoustique, cohérente ou incohérente, localisée ou répartie, réelle ou équivalente – au sein d'un environnement non simple.

Tous ces problèmes voient la nécessité de disposer de sources et de capteurs optimisés et donnant accès à des données pertinentes, et d'outils d'extraction d'une information complexe de ces données, et la fusion convenable de cette information. Ceci impliquant par ailleurs des moyens de modélisation et de simulation à des fins de compréhension ou de comparaison aux mesures, ces moyens (*computational electromagnetics/acoustics*) ayant connu un développement considérable ces quinze dernières années et migrant rapidement vers les communautés « appliquées » tout en irriguant les réflexions en amont des théoriciens.

Mais si les avancées de la mesure et de l'informatique conduisent à des signaux mieux collectés et mieux traités, et à des solutions d'inversions mieux implémentées, elles sont loin de fournir ces solutions. Certaines spécificités des structures et matériaux (incluant complexité géométrique, hétérogénéité, diffusivité, anisotropie et poro-élasticité, dispersion, magnétisme) se révèlent extrêmement exigeantes lors de la modélisation d'une interaction avec des signaux interrogateurs, compliquant d'autant l'inversion et conduisant en conséquence à des études bien rares. Par ailleurs, la prise en compte d'effets couplés (thermiques – élastiques – électromagnétiques) reste pour une grande part à mener, et de nombreuses questions théoriques demeurent ouvertes même pour des situations simples comme l'exemplifient de multiples contributions en mathématique de l'inversion (parfois ressenties comme ésotériques par le praticien mais en réalité riches d'enseignements).

Pour conclure, si l'on constate une demande croissante des utilisateurs en aval européens (exigeant des approches plus efficaces

de questions de plus grande ampleur), seuls quelques groupes de recherche français (CNRS et autres) semblent effectivement reconnus comme producteurs académiques à l'échelle internationale. Ceci mène à la mise en place de projets qui, partant de l'utilisateur et tournés vers lui, agglomèreront autour d'un but pratique commun (à visée de 3 à 5 ans) des contributeurs de disciplines variées et agissant au-delà des barrières de sections et d'organismes de recherche. Mais les progrès ne seront pas sans le soutien aux acteurs nationaux existants, notamment afin d'améliorer leur capacité de « séduire » chercheurs et doctorants et de mettre en réseau leurs expertises complémentaires.

## **7.1 OPTIQUE ET ACOUSTIQUE EN CHAMP PROCHE**

La microscopie de champ proche est dans une phase de démocratisation qui se caractérise par la diversification des matériaux (magnéto-optiques, ferro-électriques etc.) et des composants pour lesquels elle est utilisée. Les applications en optique intégrée, en nanolithographie ou en spectroscopie infra-rouge commencent à apparaître ou mériteraient d'être développées.

Les résolutions atteignent classiquement 20 ou 50 nm avec des microscopes sans ou avec ouverture. Cependant, des problèmes critiques se posent de manière récurrente au travers des pointes utilisées classiquement qui présentent de trop grands rayons de courbure et qui ne sont pas fabriquées de façon reproductible. Des techniques d'usinage par faisceaux d'ions ou d'électrons devraient permettre de lever en partie ces problèmes. Récemment, des résolutions de 1 nm ont été observées avec un microscope sans ouverture, dans lequel la pointe ne fonctionne ni en émetteur, ni en récepteur, mais se contente de diffracter en champ lointain le champ proche au voisinage de la pointe. Les travaux doivent être encouragés afin de confirmer cette observation.

De nouveaux protocoles de détection qui doivent être encouragés apparaissent également. Les effets non linéaires pourraient être utilisés à plusieurs fins. La détection du second harmonique, généré à l'interface de matériaux par ailleurs linéaires, permettrait de s'affranchir en partie de la diffraction et d'augmenter la résolution. Il est également envisageable d'utiliser des matériaux non-linéaires afin d'augmenter le confinement du champ sous la pointe. De plus, l'utilisation de nano-sources accrochées à l'extrémité des pointes représente une perspective intéressante pour sonder la densité d'états électromagnétiques locale en régime impulsionnel (variation de durée de vie par exemple). Pour nombre d'applications, il est indispensable de comprendre correctement cette interaction qui régit les problèmes de couplage entre un atome et son environnement immédiat. Enfin, et cela est vrai pour l'ensemble des protocoles existants, un effort en modélisation 3D est nécessaire pour améliorer l'interprétation quantitative des images obtenues.

À la frontière du domaine du champ proche et des cristaux photoniques figure la discipline émergente et très prometteuse de la plasmonique. Née des expériences de Ebbesen, qui ont montré que les photons, dans le domaine visible, pouvaient traverser un écran métallique percé de trous de diamètre inférieurs à la demi longueur d'onde, elle tend à montrer que l'usage des propriétés des plasmons de surface permet une miniaturisation extrême des circuits optiques en leur faisant atteindre des échelles très sub-longueurs d'ondes.

## **7.2 ANTENNES ET DISPOSITIFS HYPERFRÉQUENCE, RADARS**

Parmi les sujets les plus intéressants, on peut distinguer les technologies MEMS qui, sur le terrain fondamental, devraient laisser place aux NEMS (le nanomètre prenant le relais du micromètre), ouvrant la voie à des croisements très productifs avec l'optique, le magnétisme,

la science des surfaces, la biologie, etc. Le croisement avec l'optique appellera la mise en œuvre des concepts de l'optique en champ proche, ouvrant la voie aux MOEMS et NOEMS (nanosystèmes opto-électro-mécaniques) qui se prêteront naturellement à l'intégration. Les matériaux BIPs permettent de fabriquer des antennes angulairement et/ou fréquentiellement sélectives et devraient permettre de supprimer les ondes de surface sur le support, réduisant du même coup les couplages inter-éléments. Les systèmes micro-ondes de forte puissance sont l'objet de recherches significatives, tant pour créer un rayonnement intense dans une zone particulière d'un espace que pour s'en protéger.

Un autre sujet d'intérêt est celui des antennes intelligentes : éléments rayonnants adaptables à l'environnement, réseaux adaptatifs (e.g. matériau commandable par MEMS ou diode PIN, annulation de brouilleurs, plan de masse d'impédance réglable, etc.). La généralisation de ces nouveaux concepts au domaine optique constitue un enjeu fascinant et lourd de conséquences pratiques. Dans ce domaine, comme dans celui de la modélisation et des méthodes numériques, la collaboration avec les spécialistes du traitement de signal est très importante. Avec la montée en fréquence, le concept d'antenne miniature diélectrique pourrait émerger pour les futurs besoins des télécoms.

**Dans le domaine radar il est important d'orienter des recherches vers les Systèmes (SAR), radar polarimétrique bistatique dont l'interférométrie est l'une des composantes, afin d'améliorer le pouvoir de résolution et l'identification des zones et objets illuminés, les scènes éclairées étant soit celles du domaine maritime, soit celles du domaine terrestre pour des études à but civil et scientifique. Une attention particulière doit être également portée sur l'analyse de cibles effectuée dans leur domaine de résonance à l'aide de systèmes impulsionnels très large bande de type monostatique ou bistatique.**

### 7.3 INTERACTIONS ONDES-MATIÈRE, ONDES-STRUCTURES

La propagation des ondes électromagnétiques sous champs intenses donne lieu à des effets non linéaires souvent non désirés ou au contraire fonctionnalisés. Ces effets prennent naissance dans de nombreux matériaux massifs, structurés volontairement pour induire un quasi-accord de phase par exemple. La modélisation de ces effets est rendue difficile par la nécessité de résoudre des équations couplées non-linéaires à la fois dans les domaines spatiaux, spectraux et temporels et en général cette modélisation doit tenir compte d'autres effets, thermiques, électriques ou mécaniques par exemple. Sur un niveau plus fondamental, il apparaît clairement que le modèle généralement adopté du régime perturbatif (développement en  $c_2, c_3$ ) ne garde plus sa légitimité dans les cas d'interactions fortes. La maîtrise de ces effets représente un enjeu majeur pour l'information et la communication. Par exemple, ces interactions représentent une des butées actuelles dans la perspective des transmissions DWDM par fibres où effets Raman, Brillouin, mélange à quatre ondes introduisent de la diaphonie et du bruit dans les canaux. Au contraire, les effets non linéaires tels que la génération de second harmonique ou l'absorption à deux photons, pourraient être utilisés en imagerie en milieux diffus pour améliorer le rapport signal à bruit par filtrage spectral ou pour obtenir des informations morphologiques et fonctionnelles sur les constituants tissulaires en biologie.

En imagerie de profondeur, en biologie par exemple, la génération de second harmonique par des marqueurs incorporés dans les membranes cellulaires permettrait d'obtenir des informations ultra-structurales sur les constituants tissulaires ou des sensibilités accrues.

Le domaine du couplage ondes-structures biologiques connaît un regain d'intérêt avec le développement de la téléphonie mobile, de nombreuses études ayant déjà été menées dans le domaine des basses fréquences. Dans

le domaine des hautes fréquences, l'essentiel des études a été mené dans les gammes de fréquences de la téléphonie mobile avec comme axe principal l'analyse de l'impact sanitaire. Les systèmes sans-fil assurant une communication machine-machine impliquent aussi de prêter une grande attention à « l'obstacle homme ». Et les méthodes d'imagerie et de diagnostic (des très basses fréquences aux micro-ondes, et dans la gamme ultrasonore) impliquent aussi cette considération. En accord avec les recommandations émises en janvier 2001 à la demande du ministère de la santé par le groupe d'experts présidé par le Dr Zmirou, il faudrait encourager les études cherchant à analyser les mécanismes de base. Il serait également nécessaire d'étendre ces études aux fréquences élevées et notamment dans les gammes millimétriques. Dans le domaine de la dosimétrie, les études ont beaucoup porté sur la quantification des puissances absorbées par les tissus. Il serait nécessaire de renforcer les études axées sur la « micro-dosimétrie » et l'analyse des interactions au niveau cellulaire. Le couplage ondes-structures biologiques dans le domaine optique n'est pas moins important, même s'il est moins médiatisé. Par exemple, la visualisation optique de structures biologiques (bactéries, virus, cellules) et de leurs interactions, ou encore les moyens optiques de manipulation de ces structures (pince optique) offrent des perspectives nouvelles à la médecine. Le traitement ou le diagnostic par laser et/ou fibre optique en médecine constituent aujourd'hui des techniques reconnues aux résultats spectaculaires, dont les domaines ne cessent de s'étendre. Elles devraient bénéficier des progrès des technologies de l'optique, en particulier dans le domaine du guidage du flux de lasers de puissance par de nouvelles générations de fibres optiques.

## 7.4 LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Avec l'entrée prochaine en phase d'exploitation de divers projets tels que le projet franco-italien VIRGO, la détection des ondes

gravitationnelles promet de devenir un des feuillets scientifiques de la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Il ne s'agit pas moins que d'ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'univers.

Les ondes gravitationnelles assez puissantes pour être détectées constituent la signature des processus les plus violents de l'univers cosmique : explosions de supernovae, fusion d'étoiles binaires de grandes masses, collisions, création de l'univers lui-même durant le big bang. Aujourd'hui, toutes les informations dont nous pouvons disposer sur ces événements nous parviennent par deux voies : les ondes électromagnétiques et les particules. Le projet VIRGO nous propose une troisième voie : la détection des ondes gravitationnelles. Interagissant très peu avec la matière, les ondes gravitationnelles sont donc beaucoup moins déformées que les ondes électromagnétiques par exemple. Le revers de la médaille est que ces ondes gravitationnelles sont extrêmement difficiles à détecter, ce qui explique l'incroyable sophistication des moyens technologiques mis en place par le projet VIRGO dans la campagne toscane : un interféromètre de Michelson formé par deux bras de 3 km est chargé de détecter des variations relatives de longueur causées par des déformations de l'espace-temps (causées par la présence d'ondes gravitationnelles) de l'ordre de  $10^{-21}$  (diamètre d'un atome rapporté à la distance terre-soleil !), sachant que, entre autres facteurs de bruits, les variations relatives de longueur engendrées par les forces sismiques sont de l'ordre de  $10^{-10}$ . Avec la phase d'exploitation du projet VIRGO, les spécialistes français de détection gravitationnelle vont se tourner de plus en plus vers les projets de détection interférométrique spatiale. Il apparaît nécessaire que les éminents spécialistes français de détection puissent apporter toute leur compétence aux projets internationaux qui ont vu le jour et qui vont définir au cours des prochaines années l'importance des contributions nationales.

Ce dernier thème illustre bien la potentialité et l'interdisciplinarité du domaine des ondes. Celui-ci n'a pas fini de fasciner et d'ouvrir aux sciences et technologies de nouvelles voies de développement, ainsi que nous avons essayé de le montrer dans ce rapport.