



**Ambassade de France à Washington  
Mission pour la Science et la Technologie**

4101 Reservoir Road, NW, Washington DC 20007

Tél. : +1 202 944 6249

Fax : +1 202 944 6219

Mail : [publications.mst@ambafrance-us.org](mailto:publications.mst@ambafrance-us.org)

URL : <http://www.ambafrance-us.org>

<b>Domaine Document</b>	<b>Nanotechnologies, Photonique Rapport de mission</b>
<b>Titre</b>	<b>La nanophotonique en Californie</b>
<b>Auteur(s)</b>	<b>Daniel Ochoa</b> (attaché scientifique à San Francisco) <b>Vincent Berger</b> (directeur du MPQ - Université Paris 7) <b>Jean-Yves Duboz</b> (directeur du CRHEA à Sophia Antipolis - CNRS) <b>Emmanuel Hadji</b> (directeur du SINAPS à Grenoble - CEA/DRFMC) <b>Françoise Lozes</b> (LAAS à Toulouse - CNRS) <b>Jean-Yves Marzin</b> (directeur du LPN à Marcoussis - CNRS) <b>Jean-Louis Oudar</b> (LPN Marcoussis - CNRS) <b>Hervé Rigneault</b> (directeur du MOSAIC à Marseille - Institut Fresnel) <b>Christian Seassal</b> (INL à Lyon - UMR) <b>Roland Hérino</b> (attaché scientifique à Houston) <b>Raphaël Allègre</b> (attaché scientifique adjoint à San Francisco)
<b>Date</b>	<b>01 juin 2007</b>
<b>Contact MST</b>	<b>Daniel Ochoa ; <a href="mailto:attache-stic.mst@consulfrance-sanfrancisco.org">attache-stic.mst@consulfrance-sanfrancisco.org</a></b>
<b>Numéro</b>	<b>: SMM07_047</b>

<b>Mots-clefs</b>	Nanophotonique, nanotechnologies, optoélectronique, salles blanches, centrales technologiques, Californie, optique intégrée, optique quantique, cristaux photoniques, quantum dot, nanoimprint, technologie de l'information, télécommunications
<b>Résumé</b>	En mars 2007, un groupe d'experts français s'est rendu aux Etats-Unis pour évaluer le développement des recherches dans le domaine de la nanophotonique. Des ateliers de présentations ont été organisés et des centres de recherche universitaires comme industriels ont été visités. La mission a pu constater la vitalité des recherches menées aux Etats-Unis dans ce domaine. La nanophotonique bénéficie, en effet, des fonds considérables attribués par les agences de recherche fédérales en faveur des nanotechnologies, du partenariat entre les laboratoires académiques et les entreprises, et de nouvelles infrastructures de fabrication et de caractérisation qui ont vu le jour récemment.

NB : Toutes nos publications sont disponibles auprès de l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT), 2, rue Brûlée, 67000 Strasbourg (<http://www.adit.fr>).

# AMBASSADE DE FRANCE AUX ETATS-UNIS

MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE  
CONSULAT GENERAL DE FRANCE A SAN FRANCISCO



## COMPTE RENDU DE MISSION LA NANOPHOTONIQUE EN CALIFORNIE

Un aperçu des recherches

---

**Mars 2007**

**Daniel Ochoa** (attaché scientifique à San Francisco)

**Vincent Berger** (directeur du MPQ - Université Paris 7)

**Jean-Yves Duboz** (directeur du CRHEA à Sophia Antipolis - CNRS)

**Emmanuel Hadji** (directeur du SINAPS à Grenoble - CEA/DRFMC)

**Françoise Lozes** (LAAS à Toulouse - CNRS)

**Jean-Yves Marzin** (directeur du LPN à Marcoussis - CNRS)

**Jean-Louis Oudar** (LPN Marcoussis - CNRS)

**Hervé Rigneault** (directeur du MOSAIC à Marseille - Institut Fresnel)

**Christian Seassal** (INL à Lyon - UMR)

**Roland Hérino** (attaché scientifique à Houston)

**Raphaël Allègre** (attaché scientifique adjoint à San Francisco)

---

### RESUME

*En mars 2007, un groupe d'experts français s'est rendu aux Etats-Unis pour évaluer le développement des recherches dans le domaine de la nanophotonique. Des ateliers de présentations ont été organisés et des centres de recherche universitaires comme industriels ont été visités.*

*La mission a pu constater la vitalité des recherches menées aux Etats-Unis dans ce domaine. La nanophotonique bénéficie, en effet, des fonds considérables attribués par les agences de recherche fédérales en faveur des nanotechnologies, du partenariat entre les laboratoires académiques et les entreprises, et de nouvelles infrastructures de fabrication et de caractérisation qui ont vu le jour récemment.*

<b>I – INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>II – COMPTE RENDU DES VISITES.....</b>	<b>5</b>
ATELIER A STANFORD .....	5
<i>William Moerner</i> .....	5
<i>James Harris</i> .....	6
<i>Jelena Vuckovic</i> .....	6
<i>Olav Solgaard</i> .....	8
<i>Yoshihisa Yamamoto</i> .....	8
<i>Mark Brongersma</i> .....	10
<i>Shanhui Fan</i> .....	11
STANFORD NANOFABRICATION FACILITY .....	12
MOLECULAR FOUNDRY .....	13
NATIONAL CENTER FOR ELECTRONIC MICROSCOPY (NCEM).....	15
CALIFORNIA NANOSYSTEMS INSTITUTE (CNSI) .....	16
CALTECH.....	18
<i>Harry Atwater</i> .....	18
<i>Axel Scherer</i> .....	19
ATELIER A UCSB .....	21
<i>Matt Sysak</i> .....	21
<i>Larry Coldren</i> .....	22
<i>Daniel Blumenthal</i> .....	23
<i>Pierre Petroff</i> .....	23
<i>Evelyn Hu</i> .....	24
<i>Nathaniel Stern</i> .....	25
<i>Stacia Keller</i> .....	25
<i>Félix Mendoza</i> .....	26
<i>Visite de la salle blanche à UCSB</i> .....	27
HEWLETT PACKARD.....	28
<b>III – CONCLUSIONS THÉMATIQUES .....</b>	<b>32</b>
LA NANO-BIO-PHOTONIQUE EN CALIFORNIE.....	32
LES GRANDES CENTRALES TECHNOLOGIQUES .....	32
NANOPHOTONIQUE ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION .....	34
<b>IV - CONCLUSION .....</b>	<b>36</b>
<b>V- REMERCIEMENTS.....</b>	<b>38</b>

## **I – INTRODUCTION**

Durant ce premier trimestre 2007, la programmation de la mission scientifique de San Francisco était consacrée à la nanophotonique. Il s'agit de la science qui étudie le comportement de la lumière dans des structures de dimensions nanométriques (un nanomètre = un milliardième de mètre). Elle concerne aussi bien les dispositifs d'émission, de réception comme de transmission de la lumière, qui trouvent des applications dans des domaines variés comme l'imagerie médicale, les télécommunications, le photovoltaïque, la cryptographie quantique, l'optoélectronique, le stockage de données, et un jour peut être l'ordinateur quantique. Le numéro de février du dossier 'Sciences Physiques Etats-Unis', consacré au sujet et rédigé par les missions scientifiques de San Francisco et Houston et disponible au téléchargement sur le site internet de la mission scientifique, donne un premier aperçu de ce domaine.

Du 19 au 23 mars, une délégation d'experts français s'est rendue en Californie avec plusieurs objectifs: y établir un état de l'art précis des recherches en nanophotonique, faire la promotion de la recherche française, créer des liens de collaboration avec les équipes américaines et voir la façon dont ce domaine nouveau s'organise en Californie.

La première partie de ce rapport est un compte rendu des différentes visites effectuées, ainsi que des deux ateliers organisés à Stanford puis à UCSB. La deuxième partie est consacrée aux conclusions des différents participants, leur point de vue sur l'état des recherches californiennes en nanophotonique avec un regard comparatif par rapport à ce qui se fait en France, en insistant sur plusieurs thèmes particuliers : la bio-nano-photonique, les grandes centrales et les technologies de l'information.

La mission s'étant déroulée sur une semaine, et étant particulièrement dense, ce compte rendu peut prétendre donner une image assez fidèle et exhaustive des recherches en nanophotonique qui ont lieu dans les meilleurs laboratoires californiens.

## II – COMPTE RENDU DES VISITES

### ATELIER A STANFORD

*Lundi matin. Rédacteurs : Jean Yves Duboz, Hervé Rigneault*

Cette première journée de la mission s'est déroulée sur le site de l'université de Stanford. Un workshop sur la thématique de la Nanophotonique a permis aux chercheurs américains et français de présenter leurs travaux et d'échanger leurs points de vue sur les recherches en cours. Nous donnons ici un résumé des contributions américaines.

#### **William Moerner**

*Single Molecule Biophysics, Nanophotonics and Trapping*

Le groupe de W. Moerner s'intéresse essentiellement à trois thématiques :

- Molécules individuelles, Spectroscopie et applications en biophysique :

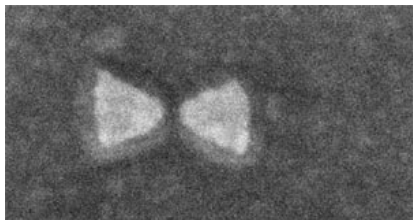
Des molécules individuelles sont utilisées comme sondes locales. Ce sont essentiellement des colorants (TMR, DCDHF ou GFP). La molécule rapporte une information sur son environnement local et offre ainsi la possibilité de réaliser des mesures sous la limite de diffraction.

Dans la cellule, les protéines de fusion (GFP) fluorescentes vont rapporter sur le fonctionnement de la cellule à l'échelle moléculaire. Les travaux se concentrent sur la bactérie *Caulobacter crescentus* (bactérie qui a une division asymétrique – l'une à un flagelle, pas l'autre), et plus particulièrement sur la protéine MreB (protéine impliquée dans le cytosquelette). Ces protéines MreB sont suivies par SPT (single particle tracking) pour observer les processus de polymérisation des filaments d'actine et leurs directions dans la bactérie (on les trouve perpendiculaire à la direction du grand axe de la bactérie).

- Nanophotonique :

L'équipe s'intéresse essentiellement aux structures 'Bow Tie' (deux triangles en métal qui se font face). L'espace entre les triangles est varié (de quelques dizaines à quelques centaines de nm). On cherche ainsi à avoir des exaltations électromagnétiques aux bouts des pointes. Pour observer cette exaltation, on utilise la fluorescence à deux photons de l'or directement. On observe alors que le signal provient essentiellement de la pointe des pyramides (lieu de l'exaltation maximale). On peut aussi vérifier que c'est la zone où on obtient le plus de polymérisation de résine (lorsque l'on recouvre la structure d'un film de résine).

On peut également utiliser ces structures pour l'exaltation SERS (pour les molécules de p-mercaptoaniline).



« nœud de papillon » métallique (en or) conçu et fabriqué dans le groupe de W. Moerner. Cette structure utilise des résonances plasmons et des effets non-linéaires pour amplifier un de la lumière à l'échelle nanométrique. Dans l'interstice entre les deux triangles, qui mesure à peine 20nm, le champ électromagnétique d'un laser incident est amplifié jusqu'à 1000 fois.

Crédits : W. E. Moerner, Stanford University, in *Nanoletter*

- ABEL trap – Anti Brownian Electrokinetic trap

Principe de fonctionnement : On mesure la position de la molécule par fluorescence (détection de molécule individuelle), ensuite on applique un potentiel pour ramener la molécule à la position désirée. Si cette opération est effectuée assez rapidement, le mouvement Brownien peut être annulé. Ce piège utilise la force électrophorétique et/ou électroosmotique. Le piège marche en 2D, le confinement suivant z est assuré par la fluidique (canal étroit dans cette dimension).

Ce piège a été utilisé pour bloquer la diffusion Brownienne de l'ADN en solution, on peut alors observer les modes de vibration propre de l'ADN (la diffusion étant bloquée).

## **James Harris**

### *The role of material Nanophotonics*

En tant que responsable d'un groupe de croissance de matériaux par épitaxie, J. Harris se définit lui-même comme positionné en amont de la chaîne complète de la nanophotonique. Après avoir rappelé la médiocrité du silicium pour la photonique, il a expliqué pourquoi on est obligé d'avoir à disposition une panoplie très complète de matériaux pour la photonique, correspondant à des applications et des gammes spectrales variées. Pour lui, l'élément clé pour l'intégration de la photonique, à l'instar de l'oxyde de silicium pour la microélectronique, pourrait bien être l'oxyde d'aluminium. Concernant les résultats récents, et pas nécessairement en nanophotonique, J. Harris a rappelé les bons résultats obtenus sur les lasers à base de nitrures dilués et la réalisation du premier laser à émission verticale (VCSEL), le tout à base de nitrures dilués, sur substrat GaAs et à 1.55 $\mu\text{m}$ . Mais les matériaux III-V n'ont pas l'exclusivité des applications optoélectroniques, même si ils en représentent une part très majoritaire. Les puits quantiques SiGe/Si peuvent être exploités pour réaliser des modulateurs optiques à 1.42 $\mu\text{m}$  basés sur l'effet Stark. Pour faire un modulateur performant, il faut que les raies excitoniques soient les plus fines possible. Ceci est possible en vertu du fort confinement en centre de zone pour les électrons. Pour être rapide, il faut que les porteurs photocréés puissent disparaître rapidement du puits : la faible énergie des vallées, hors du centre de zone, doit en principe faciliter l'échappement des porteurs. Tout ceci reste à confirmer expérimentalement. Plus proche de la nanophotonique au sens strict, J. Harris a présenté la réalisation de sources à forte brillance obtenues en renforçant l'émission lumineuse à travers une ouverture en forme de nœud-papillon dans le miroir supérieur. Des fentes supplémentaires sont ajoutées pour le contrôle de la polarisation. Le champ émis est de forme carrée. Dans le domaine de l'optique non linéaire, il a montré une alternative aux miroirs DBR sur un guide d'onde. Ces derniers ne présentant pas une transmission optimale pour les harmoniques ( $2f$  en particulier), une solution est proposée qui consiste à placer les structures DBR en position adjacente par rapport au guide. Au delà de ses sujets propres, on constate aussi que les matériaux issus du groupe de J. Harris alimentent les travaux de plusieurs groupes de Stanford et d'autres universités californiennes.

## **Jelena Vuckovic**

### *Nanophotonics chips for optical interconnects and quantum communication*

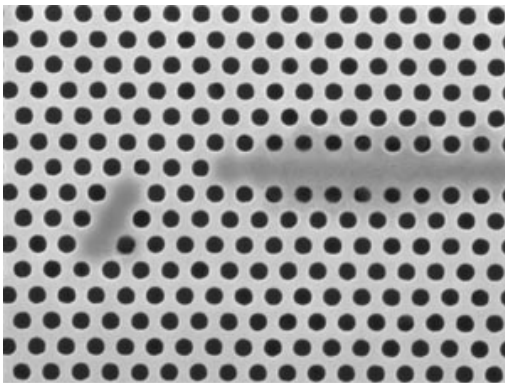
Jelena Vuckovic est une jeune chercheuse qui incarne le mode de fonctionnement de Stanford : elle a été recrutée après sa thèse en provenance d'une autre université (Caltech), a rapidement pris la responsabilité d'un groupe, et est maintenant responsable d'un groupe d'une dizaine de personnes (étudiants en grande majorité). Mobilité, responsabilisation rapide et équipe d'une dizaine d'étudiants sont des dénominateurs que l'on retrouve fréquemment chez les chercheurs que nous avons rencontrés. Signalons en passant (ce n'est pas lié à la nanophotonique) que la mobilité affecte également les étudiants qui sont fortement incités à ne pas faire leur thèse là où ils ont commencé leurs études. Les travaux de Jelena Vuckovic sont au cœur de la nanophotonique : elle fabrique et

étude des cristaux photoniques (PC) de type 2D+1 (PC dans un guide membrane) pour réaliser des composants de télécommunications ou de photonique quantique. La fabrication est classique, alliant lithographie électronique et gravure plasma. La partie active, l'émetteur, est constituée de boîtes quantiques (QD) soit de puits quantiques (QW) à base de matériaux de type Si, GaAs ou InP, venant en partie du groupe de J. Harris.

Le rayonnement de ces émetteurs permet de mesurer les facteurs de qualité  $Q$  des cavités réalisées dans les PC. Des valeurs à l'état de l'art pour les matériaux III-V ont été mesurées, avec  $Q=15000$ . La comparaison avec les valeurs atteintes dans le silicium ( $10^6$ ) montre la différence de maturité entre ces matériaux. Il faut signaler aussi que pour beaucoup d'applications (notamment laser rapide) des valeurs intermédiaires de  $Q$  sont recherchées afin d'optimiser simultanément le temps de déclin de la luminescence de la cavité ( $Q$ ) et le délai de commutation ( $V/Q$ ). Ceci implique aussi que des volumes faibles sont recherchés : J. Vuckovic a atteint des volumes de cavités de  $0.5(V/n)^3$ . Des temps entre 1.5 et 2ps sont atteints, permettant d'entrer dans la gamme des 100GHz de fonctionnement. Ces temps tendent à s'allonger si on pompe différents laser à nanocavité (sur une même plaque) en même temps. Corrélativement, la puissance seuil par laser tend à diminuer. Ces deux observations montrent que les lasers se couplent entre eux, ce qui n'était pas forcément prévu initialement.

Les switch optiques sont un autre domaine d'application de ces cavités en PC. Une telle cavité insérée dans un guide d'onde peut être commandée (en pratique cela repose sur un décalage de la résonance de la cavité) par un pulse optique ultra court et permettre de transmettre ou non le signal dans le guide. Une énergie de pulse de 60fJ suffit pour réaliser la commutation à des fréquences de 20-100GHz.

Enfin les derniers résultats présentés concernaient les sources à photon unique. Une boîte quantique unique est placée dans une cavité à PC (de  $Q=1000$ ), et deux cavités de ce type sont fabriquées, reliées entre elle par un guide d'onde (longueur 25 $\mu$ m). On peut alors exciter optiquement la première cavité et regarder la luminescence de cette cavité ou celle de la seconde cavité. Le passage par le guide permet de mieux filtrer la lumière émise. Dans les deux configurations, l'émission de photons uniques est observée avec une corrélation de 30% à  $t=0$  (0 serait l'optimum, 100 serait une source classique). On voit sur cet exemple la richesse possible des PC qui permet de combiner, de coupler plusieurs cavités, et peut constituer les prémices d'un réseau complet pour le calcul quantique, comme cela sera repris lors d'autres visites. Il convient de signaler un moyen d'aligner les boîtes quantiques par rapport au PC : pour l'instant, la méthode retenue est quelque peu brutale : la BQ est repérée par microscopie à force atomique, cartographiée, et le PC est dessiné autour de la BQ. Même si cette approche marche, elle paraît peu généralisable à des systèmes plus complexes et d'autres voies sont probablement explorées, mais la communication reste discrète sur ce sujet.



Cristal Photonique GaAs servant de source de photon unique.

Une boîte quantique en InGaAs est isolée, et autour d'elle est gravé une cavité PC (à gauche de l'image), avec laquelle elle se trouve en résonance. Un guide d'onde PC est également gravé (à droite) pour permettre de filtrer la lumière émise, et de la coupler éventuellement avec une autre cavité.

La croissance est effectuée dans le groupe de James Harris.

Crédits: J. Vuckovic, Stanford University

## Olav Solgaard

### *Wavelength control with MEMS and PC*

Olav Solgaard est attaché au Ginzton Laboratory. Il a passé une bonne partie de sa carrière à Stanford, y compris sa thèse, et est co-fondateur de Silicon Light Machine. Il travaille aujourd'hui sur l'utilisation des PC pour faire des composants optiques (miroirs, filtre en polarisation...).

En ce qui concerne les miroirs, les PC (utilisés en centre de zone, proche des points  $\Gamma$ ) peuvent permettre d'atteindre des réflectivité supérieures à 99%, indépendamment de la polarisation et ce pour des angles d'incidence allant jusqu'à  $20^\circ$ , ce que les miroirs diélectriques peinent à atteindre. Expérimentalement, de tels miroirs sont en effet réalisés et intégrés sur des MEMS. La fabrication est compatible avec des procédés à haute température, atout important. Le miroir oscillant à 4kHz atteint une réflectivité de 98% sur un angle de  $30^\circ$ . En changeant la symétrie des trous dans le PC ou la forme de la cellule élémentaire, la théorie indique que l'on peut faire apparaître des modes nouveaux, ou faire apparaître une biréfringence.

Ce genre de miroir peut aussi être utilisé pour réaliser des senseurs acoustiques très sensibles. Une cavité optique dont un des miroirs est mobile sous l'effet d'une onde acoustique, est lue optiquement à  $1.4\mu\text{m}$ . Le miroir étant constitué de PC, la cavité est très courte et donc très sensible. A l'arrivée, une différence de pression de  $18\mu\text{Pa}$  est détectable jusqu'à une fréquence de 100kHz.

Tous les démonstrateurs évoqués ici sont réalisés en Si et sont lus à des longueurs d'onde de l'ordre de  $1\mu\text{m}$ . Pour des applications à des longueurs d'onde plutôt dans le visible, comme c'est le cas pour la biologie, la fabrication doit être réalisée dans des matériaux à plus large bande interdite : le diélectrique  $\text{Si}_3\text{N}_4$  est une solution.

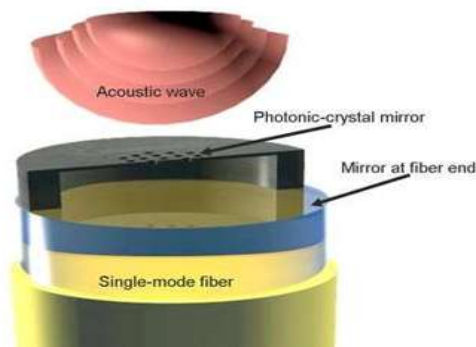


Schéma d'un capteur acoustique utilisant un interféromètre Fabry-Pérot à cristal photonique (pas à l'échelle).

Crédits Olav Solgaard, Stanford University, O. Kilic, M. Dignonnet, G. Kino, O. Solgaard, "External Fiber Fabry-Perot Acoustic Sensor Based on Photonic Crystal Mirror", 18th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-18), Cancun, Mexico, October 2006.

*Lundi après midi, atelier à Stanford. Rédacteurs : Vincent Berger, Jean Yves Marzin*

## Yoshihisa Yamamoto

### *Quantum key distribution over 200km fiber transmission line*

Le professeur Y. Yamamoto a présenté à la délégation des travaux récents sur la distribution de clef quantique à longue distance. Le professeur Yamamoto partage son temps entre le Japon et l'Université Stanford. Depuis longtemps ses recherches ont pour objectif d'utiliser des dispositifs semiconducteurs dans le domaine de l'optique quantique ou de l'information quantique. Il a par exemple réalisé des lasers à semiconducteurs émettant de la lumière comprimée, observé l'effet Purcell dans des émetteurs boîtes quantiques, ou réalisé des sources de photons uniques pompées électriquement. Il collabore avec l'équipe de Serge Haroche (ENS, LKB), dans le cadre d'un projet



sur l'intrication quantique, qui s'est déroulé de 1999 à 2003 et a été renouvelé pour la période 2004-2008.

Le domaine de l'information quantique affiche comme objectifs des réalisations à portée de main (cryptographie quantique), des champs plus généraux tels que la métrologie, les tests de la physique quantique, et finalement le graal que constitue l'ordinateur quantique. Ce domaine associe effectivement des objectifs très long terme, qui se caractérisent par une complexité du système et un nombre de Qbits indépendants très élevé, (qui relèvent aujourd'hui quasiment de la science fiction si l'on considère les spécifications requises) et des objectifs beaucoup plus accessibles, voire déjà atteints, dans le domaine de la cryptographie quantique par exemple.

La complexité multi échelle de ce domaine est une chance pour l'information quantique : cela permet de commencer la démonstration de concepts simples sur des petits systèmes qui marchent tout en concevant en parallèle des systèmes plus sophistiqués et à plus long terme, et donc d'obtenir des résultats concrets le long de la route qui mène à l'ordinateur quantique, trop longue pour être menée sans ravitaillement. Cette même idée sera reprise sur le mode industriel lors de la visite au QSR de HP quelques jours plus tard. Stanley Williams, directeur du QSR, ne dira pas autre chose en affichant la volonté de HP de trouver un marché pour des objets élémentaires utilisant un seul Qbit (comme par exemple le générateur de nombres aléatoires) pour enclencher le cercle vertueux de l'information quantique par un marché initial finançant la suite des recherches. (voir plus loin).

Le professeur Yamamoto a rappelé rapidement ses travaux sur la réalisation de sources de photons uniques, qui constituent un des dispositifs importants pour l'information quantique, puisque les sources classiques de photons atténués ne peuvent pas éviter de fournir de temps à autre plus qu'un seul photon, ce qui limite la sécurité des communications quantiques. Le professeur Yamamoto a également présenté un protocole de communication quantique originale : le « DPS QKD » c'est-à-dire une distribution de clef quantique à protocole de phases différentielle. En utilisant comme variable supplémentaire l'instant d'arrivée des photons, le protocole DPS QKD (voir K. Inoue et al. Phys. Rev. Lett. 89, 37902 (2002) pour approfondir) permet d'obtenir une sécurité accrue par rapport au BB84 utilisant une source atténuée, en évitant les attaques liées au caractère multiphotons de ces sources poissonniennes. Bien que les performances restent théoriquement inférieures à celles obtenues avec des sources de photons uniques parfaites, le fait que ces sources parfaites n'existent pas à l'heure actuelle font que le protocole DPS QKD reste un compromis excellent entre réalité (et non idéalité) des sources classiques atténuées et performances du système de communication quantique. L'équipe du professeur Yamamoto a ainsi montré que le DPS QKD permet concrètement d'augmenter la sécurité de communications quantiques, avec une démonstration sur une longueur de fibre supérieure à 200 km.

Par ailleurs, les sources ne sont pas le seul sujet d'intérêt de ce groupe puisqu'ils ont également démontré des travaux sur la détection de photons uniques à 1.55 microns par deux méthodes différentes : conversion de fréquence dans des guides PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) suivi d'un comptage de photon avec un détecteur Silicium (sur le même campus le groupe de Marti Fejer est certainement le leader mondial de cette technologie PPLN), ou alors détecteur supraconducteur. La première solution nonlinéaire permet de « traduire » en fréquence le photon à 1.55 micron et d'atteindre le domaine spectral vers 800 nm où les compteurs de photons en silicium sont excellents. La conversion de fréquence est réalisée dans le guide PPLN avec un excellent rendement de 95%, mais le rendement global chute à 43% si l'on considère tous les couplages de lumière entre les différents composants ; par ailleurs le problème de cette solution est le nombre de coups noirs qui restent élevés ( $10^6$  par seconde).

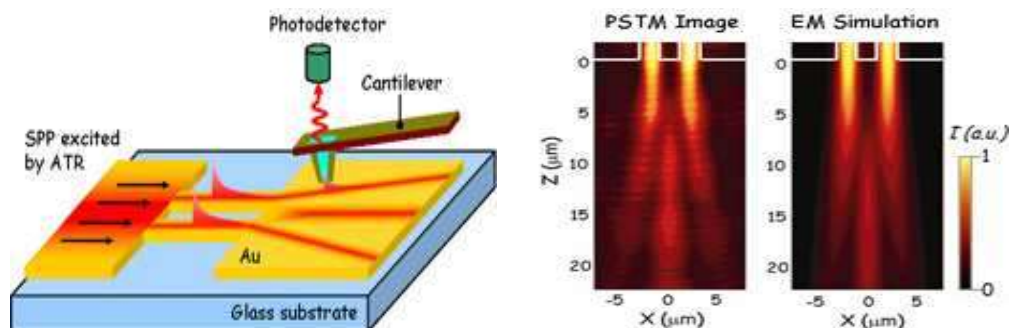
Globalement, le groupe du professeur Yamamoto montre une très belle activité, leader dans le domaine de l'information quantique, et surtout diversifiée sur le plan horizontal : il s'intéresse à tous les éléments de la chaîne d'un système d'information quantique, de la conception des protocoles à la réalisation des différents composants (sources, détecteurs), contrairement à de nombreux groupes

(français notamment), qui focalisent leur étude que sur un petit élément du système et qui n'atteignent donc pas la vision globale que peut montrer le professeur Yamamoto.

## Mark Brongersma

### *Plasmonics - The next wave of chipscale technologies*

Un second exposé dans l'après midi, donné par le professeur Mark Brongersma, a abordé le sujet très chaud actuellement de la plasmonique. La plasmonique s'intéresse à l'ingénierie de modes électromagnétiques à l'interface entre des métaux et des diélectriques. En utilisant des modes évanescents, qui peuvent atteindre des facteurs d'exaltation du champ électromagnétique très élevés, la plasmonique permet d'augmenter l'interaction lumière matière, avec différentes perspectives : les détecteurs (de molécule, dans des régimes bas bruit liés au volume très faible, également dans des régimes de haute fréquence pour les mêmes raisons), les modulateurs, les interconnexions optiques. Ces sujets sont fortement liés à d'autres thématiques utilisant des matériaux métallo-diélectrique, tels que les matériaux « main gauche » issus de la communauté des cristaux photoniques, ou les dispositifs Thz issus de la communauté des lasers semiconducteurs (les guides plasmoniques ont été introduits pour les lasers à cascade quantique avant les démonstrations de transmission exaltée par des modes plasmoniques dans des trous sub longueurs d'onde par Ebbesen et collaborateurs), ou encore la spectroscopie Raman exaltée, thématique déjà ancienne où l'on utilise les « points chauds » du champ électromagnétique présents dans des nanoparticules métalliques pour exalter la luminescence Raman (ou la luminescence tout court) d'espèces à caractériser. Le dénominateur commun de tous ces sujets est la notion de champ évanescent, qui présente donc la possibilité d'être exalté, sur une petite taille, ce qui signifie également haute fréquence. On prétend dépasser la limite de Rayleigh qui empêche à la photonique classique d'accéder à des dimensions sub longueurs d'onde, et également dépasser les limites en fréquence posées en électronique par les constantes de temps RC imposées par la taille des systèmes. Petite taille, haute fréquence. Toute la photonique en champ proche et donc naturellement la nano-photonique, est concernée par l'émergence de la plasmonique, qui a émergé simultanément de communautés très différentes : électromagnéticiens (et spécialistes des cristaux photoniques), spectroscopistes, physiciens des dispositifs semiconducteurs. Cette thématique de la plasmonique sera par ailleurs également abordée largement dans le second workshop de la semaine à Caltech (par H. Lezec et A. Scherer), à HP (réalisation par nanoimprint de nanomatériaux en structures homogènes avec exaltation de luminescence pour la spectroscopie appliquée à la biologie ou la médecine), voir plus loin. Dans cette thématique, la France est également bien positionnée dans le concert international, avec des recherches très en vue aussi bien au niveau académique que dans le milieu industriel.



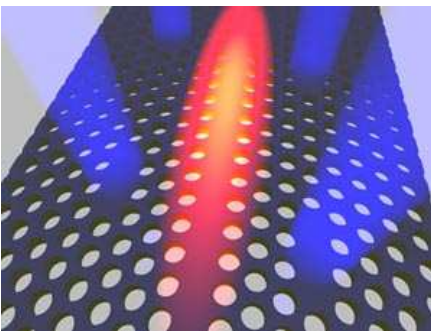
Simulation et mesure par PSTM (Photon Scanning Tunneling Microscope) de la propagation d'une onde plasmonique à la surface d'une expérience de type 'fente d'Young'. Crédits Mark Brongersma, Stanford.

## Shanhui Fan

### *Exploring properties of light in nanophotonic structures*

Le dernier exposé de l'après midi a été proposé par le professeur Shanhui Fan. Issu de la communauté des théoriciens des cristaux photoniques (formé dans le groupe de Joannopoulos au MIT), le professeur Fan étudie actuellement des structures photoniques complexes présentant des propriétés originales : localisation de la lumière ou lumière lente dans des structures à cristal photonique, qui sont composées de chaînes de cavités couplées, réalisation de miroirs de Bragg en guide d'onde réfléchissant la longueur d'onde de pompe mais sans influencer sa seconde harmonique (pour les applications optiques nonlinéaires poursuivies dans le groupe de Marti Fejer), structures optimisées pour obtenir le couplage fort entre une boîte quantique et une cavité à cristal photonique, structures dispersives originales dans lesquelles deux photons vont être corrélés par l'interaction à travers la structure photonique. Ce dernier type d'interaction n'est pas sans rapport avec les propositions de phénomènes optiques nonlinéaires à seuil extrêmement bas, qui sont désormais envisagées au niveau du photon unique grâce aux facteurs de qualité gigantesques et aux tout petits volumes que l'on peut atteindre simultanément sur les systèmes actuels à base de cristaux photoniques.

Ce groupe présente une grosse créativité, et confirme l'importance de disposer d'une grande maîtrise des outils de FDTD 3D modernes pour proposer des structures électromagnétiques ou photoniques nouvelles. Dans ce domaine, les degrés de liberté sont très nombreux, ce qui fait que l'imagination est au pouvoir. Il s'agit donc logiquement d'un domaine où le nombre de publications explose. Cependant, l'intuition est très vite dépassée par la complexité des équations de Maxwell, surtout quand on aborde les effets nonlinéaires. Dans ce cas, la maîtrise des outils numériques les plus performants est une nécessité. Ce qui est remarquable dans le travail du professeur Fan est le lien réussi entre les modélisations et des réalisations concrètes (des dispositifs semiconducteurs) réalisés dans d'autres groupes. On peut regretter, en France par exemple, un manque de soutien des équipes expérimentales par les théoriciens. On caricature à peine en disant que souvent chaque équipe expérimentale développe des outils théoriques bricolés à la maison (commerciaux par exemple), et rares sont les soutiens massifs de groupes de véritables modélisateurs pour le design d'un vrai dispositif comme peut le faire le groupe du professeur Fan.



Structure à cristal photonique sur membrane (vue d'artiste) destinée aux expériences du groupe de S. Fan sur le ralentissement de la lumière. Crédits S. Fan, Stanford.

## STANFORD NANOFABRICATION FACILITY

*Lundi après midi, visite. Rédacteurs : Vincent Berger, Jean Yves Marzin*

L'université Stanford dispose par ailleurs sur son campus d'un établissement de technologie à l'échelle nano, le Stanford Nanofabrication Facility (SNF). Cet organisme est conçu sur un fonctionnement de mutualisation, à l'intérieur du réseau NNIN. Le NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network), né en 2004, est financé par la National Science Fondation (NSF) et réunit 13 universités partenaires hébergeant des établissements de ce type sur tout le territoire américain. Sur un total de 200 utilisateurs différents par mois au SNF (600 par an), on compte typiquement 130 utilisateurs académiques de Stanford, 20 en provenance d'autres sites, et 50 industriels (qui payent leur accès deux fois plus cher que les académiques), ce qui représente un quart : cela est assez remarquable pour être signalé.

Dans 1000 m<sup>2</sup> de salles blanches de classe 100, les activités du SNF sont essentiellement dévolues aux technologies Silicium (dont un tiers sur les MEMS), ce qui facilite sans aucun doute cet accès mutualisé à des utilisateurs variés : bon nombre de process sont « stabilisés » et certains équipements sont séparés, afin de ne pas mélanger des matériaux différents qui pourraient poser des problèmes de contamination (GaAs et Si notamment). Signalons aussi que la taille des substrats acceptés va de 4 à 6 pouces. Des équipements d'analyse (TEM, SEM, FIB, diffraction X) environnent les équipements de technologie proprement dite. Les tarifs d'accès sont horaires, par équipement utilisé, et sont disponibles sur le web, avec un tarif d'accès initial par personne de 2000 \$. Le SNF affiche une politique volontariste de partage des savoir faire, et de sa diffusion entre les utilisateurs, chaque utilisateur prenant ses responsabilités sur le plan de la responsabilité intellectuelle. Deux start up : Matrix memory (achetée par Sandisk pour 250 M\$) et Silicon light machines (achetée par Cypress pour 100 M\$), sont des exemples de *success stories* issues du SNF. Pour en savoir plus : <http://snf.stanford.edu>.

Signalons que son mode de fonctionnement, comme celui des autres centrales que nous avons visitées, est dit « user operated ». Les utilisateurs, en grande partie des étudiants, font le travail eux même. Les 25 personnes de la SNF ne sont là que pour la maintenance, la formation des utilisateurs et la sécurité.

Il est incontestable que le nombre d'utilisateurs différents, le taux d'accès d'industriels importants, et la politique volontariste de partage des savoir-faires, sont les éléments qui témoignent du succès de cette entreprise. La taille critique du bassin scientifique et technologique américain facilite sans doute ce type de mutualisation, en permettant d'atteindre vite un nombre d'utilisateurs significatif sur une filière technologique spécifique, ce qui permet d'entrer dans un processus vertueux. La comparaison avec la France (5 centrales de technologie en France contre 13 dans le réseau NNIN) fait penser que cette taille critique est normalement difficile à atteindre en France, et incite à réfléchir à une structuration à l'échelle européenne. Ce fonctionnement peut aussi inviter à une réflexion sur le mode de fonctionnement des centrales technologiques françaises comparées à leurs homologues américaines qui fonctionnent 24h/24, 356j/an et sont clairement séparées de l'université d'adossment.

## MOLECULAR FOUNDRY

*Mardi matin, visite. Rédacteurs : Jean Louis Oudar, Emmanuel Hadji*

La visite a commencé par une présentation du Centre par James Bustillo, Directeur associé, et s'est poursuivie par une rapide visite des installations.

La Molecular Foundry a pour vocation de mettre à disposition ses instruments, ses méthodes et ses chercheurs au service d'utilisateurs extérieurs, porteurs de projets de recherche de haut niveau dans le domaine des nanosciences.

Ce laboratoire, dont le chantier a démarré en 2004 et qui a ouvert ses portes fin 2006, fait partie des cinq nouveaux centres de recherche en nanosciences financés par le Department of Energy (DoE), suite à l'ambitieux programme national sur les nanotechnologies (NNI), lancé en 2001 par le gouvernement fédéral. Il est spécialisé dans la synthèse, la caractérisation et la modélisation de structures organiques et inorganiques à l'échelle nanométrique. La construction du bâtiment a mobilisé un budget de 45 millions de dollars, les équipements de recherche \$40 millions, pour un budget annuel d'opération de \$20 millions.



La Molecular Foundry se présente sous la forme d'un bâtiment de 6 étages situé au sommet du campus de Berkeley. Chaque étage correspond à un laboratoire regroupant chacun 3 ou 4 chercheurs permanents sous la responsabilité d'un directeur scientifique. Les chercheurs consacrent la moitié de leur temps au soutien des utilisateurs extérieurs, et l'autre moitié à leurs propres travaux de recherche.

Les 6 laboratoires sont structurés autour de différents thèmes. Trois thèmes sont centrés sur le type d'objets étudiés :

- Nanostructures inorganiques (nanotubes de carbone, nanofils, synthèse colloïdale)  
sous la direction de : A.P. Alivisatos
- Synthèse organique et macromoléculaire  
sous la direction de : J.M.J. Fréchet
- Nanostructures biologiques,  
sous la direction de : C.R. Bertozzi

et trois autres regroupent des activités de nature transversale :

- Théorie des matériaux nanostructurés  
sous la direction de : S.G. Louie
- Imagerie et manipulation de nanostructures  
sous la direction de : M. Salmeron
- Nanofabrication (notamment lithographie électronique et nano-impression)  
sous la direction de : J. Bokor

Ce dernier laboratoire joue un rôle particulier puisqu'il abrite les moyens de nanotechnologie qui peuvent être nécessaires aux projets scientifiques développés dans les différents laboratoires et doit être un « lieu » de croisement des différentes thématiques.

Les moyens technologiques sont à l'état de l'art, mais il ne semble pas y avoir de développements instrumentaux spécifiques de sorte que ces moyens sont semblables à ceux que l'on trouve généralement dans ce type de salle blanche. La surface de salle blanche est de 370 m<sup>2</sup> répartie en classe 100, 1000 et 10.000, ce qui ne présente donc pas là non plus de caractère particulier.

La spécificité de la Molecular Foundry, outre la qualité de son environnement scientifique, réside donc clairement dans la volonté de réunir dans un même environnement (bâtiment) des chercheurs de cultures scientifique différente pour défricher ou créer de nouveaux champs d'investigation scientifique.

L'accueil de projets passe par l'envoi d'une proposition de projet, examinée par un comité d'évaluation. Les projets sont sélectionnés sur la base de l'intérêt scientifique, de la faisabilité technique, l'aptitude du groupe d'expérimentateurs, et la disponibilité des ressources. Le taux de sélection est actuellement de l'ordre de 7 sur 10, mais devrait être plus bas en rythme de croisière. Le nombre des projets soutenus jusqu'à présent s'élève à 123, dont 10 avec des équipes internationales. Statistiquement, la provenance des utilisateurs est la suivante : 71% viennent des universités, 21% d'organismes de recherche, et 8% de l'industrie. Géographiquement, ils proviennent de 22 états US et de 10 pays étrangers, dont la France.

Il est intéressant de noter que les projets n'ont pas de charges à supporter tant que la propriété intellectuelle des résultats obtenue n'est pas exigée. Par ailleurs, la Molecular Foundry intègre une équipe technique ainsi que des points de contact recherche (chercheurs) pour accompagner les projets extérieurs et conduit aussi sur la base de ses laboratoires des programmes de recherche internes.

Enfin le site du LBNL a été choisi en raison de sa proximité avec d'autres « grands instruments » offrant des services complémentaires : Advanced Light Source (ALS, source de rayons X et UV), le NCEM (voir ci-après) et le NERSC (centre de calcul scientifique).

Pour plus de détails on verra le site web <http://foundry.lbl.gov.research/research.html>

## NATIONAL CENTER FOR ELECTRONIC MICROSCOPY (NCEM)

*Mardi matin, visite. Rédacteurs : Jean Louis Oudar, Emmanuel Hadji*



Vue aérienne du NCEM, situé sur la colline de Berkeley, à côté de la Molecular Foundry. Le grand bâtiment sombre à droite abrite le microscope ARM (Atomic Resolution Microscope), qui fut le premier instrument au monde à atteindre en routine la résolution de l'Angström, mais qui est en voie de démantèlement. Le deuxième grand bâtiment à gauche accueillera le microscope TEAM, qui permettra une résolution de 0.5 Å.

Les installations de ce centre avancé de microscopie électronique nous ont été présentées de manière très enthousiaste par son directeur, Ulrich Dahmen.

Etabli en 1983, ce Centre est une référence mondiale en matière de microscopie électronique, en raison des instruments extrêmement performants dont il est équipé. Comme la Molecular Foundry, c'est un centre ouvert à des scientifiques utilisateurs extérieurs, et il est également financé par le DoE. Les utilisateurs bénéficient d'un soutien des personnels permanents du centre, environ une douzaine de personnes, dont cinq chercheurs et le reste en ingénieurs et techniciens.

Le Centre est équipé de six microscopes électroniques à haute résolution, d'installations informatiques spécialisée dans l'analyse d'images, d'une installation FIB d'usinage par faisceau d'ions focalisés, et d'un laboratoire de préparation des échantillons. A noter parmi les équipements un microscope électronique à transmission dont la résolution peut atteindre 0.8 Å, grâce à un dispositif de correction d'aberrations et une alimentation électrique à haute stabilité.

Dans une optique d'amélioration constante des performances de ses équipements, le centre est impliqué dans plusieurs projets visant à développer davantage la résolution des instruments existants, ou à en développer de nouveaux.

On notera en particulier, le projet TEAM (Transmission Electron Aberration-corrected Microscope), dont l'objectif est la construction, pour 2009, d'un microscope de nouvelle génération. Le projet se déroulera en deux phases. Une première, au cours de laquelle il est prévu de réaliser l'appareil TEAM 0.5 intégrant la correction des aberrations sphériques. Puis une deuxième, TEAM 1, qui devra corriger les aberrations sphériques et chromatiques. L'objectif affiché est d'atteindre une résolution de 0.5 Å STEM

Ce projet s'appuie sur la collaboration de 5 groupes de microscopistes, et sur un important financement du DoE, dans le cadre de la Feuille de route à 20 ans des Grands Instruments pour le Futur de la Science (dont fait aussi partie le projet ITER).

Pour plus de détails on verra le site web <http://ncem.lbl.gov/>

## CALIFORNIA NANOSYSTEMS INSTITUTE (CNSI)

*Mercredi matin, visite. Rédacteurs : Jean Yves Marzin, Françoise Lozes*

Le CNSI (à UCLA <http://www.cnsi.ucla.edu/>) est un des quatre CALISI (Californian Institute for Science and Innovation). Il a une double implantation à UCLA et UCSB.

Le centre de UCLA est localisé dans un bâtiment à l'architecture remarquable de 18 000 m<sup>2</sup>, sur 7 étages, en cours d'aménagement au moment de la mission. Nous y avons été très bien accueillis par David Lundberg, directeur des relations internationales du centre.

Le budget de création du centre de UCLA est de 160 M\$, dont 50 ont été apporté par l'Etat de Californie et le reste par l'Université (UCSB a également reçu 50M\$ de l'état de Californie au titre du CNSI). Ce financement découle d'un changement de politique des états, qui ne financent plus seulement l'éducation mais aussi la recherche. Ce centre, entièrement dédié à la recherche, est situé (c'était la solution techniquement la plus difficile, mais qui a été imposée par les bailleurs de fond !) au cœur du campus, à proximité des départements d' Engineering et de sciences pour la santé et médecine.

Le directeur est Sir Fraser Stoddart (chimiste) avec deux directeurs adjoints, Eli Yablonovitch, qui s'occupe de la partie Ingénierie et Leonard Rome, en charge des Sciences de la vie et des recherches médicales.

Le centre est indépendant. Ses membres sont des universitaires enseignant par ailleurs dans les différents départements de l'université (15 nouveaux postes ont été ouverts pour le centre, dont 8 ont été pourvus). De nombreux industriels sont également partenaires du centre (Intel, HP, Sun, Veeco, Hitachi, BASF...)

La structure, assez compliquée, repose sur des groupes thématiques (transverses), des laboratoires cœur (ceux dirigés par les membres du CNSI) et des centres de recherche partenaires.

Les groupes thématiques, reflétant l'interdisciplinarité du centre, sont :

- Energy Efficient Technologies
- Next-Generation Information Technologies
- New Biomedical Sensing, Diagnosis, & Therapy
- Energy
- Environment & NanoToxicology
- NanoBiotechnology
- NanoMechanics & Nano Fluidics
- NanoElectronics & NanoSpintronics

Les laboratoires cœur correspondent aux infrastructures qui seront implantées dans le bâtiment (à partir d'avril 2007) :

- Advanced Light Microscopy/Spectroscopy (Weiss)
- Coherent Imaging Lab (Miao)
- Electron Imaging Center for Nanomachines (Zhou)
- Integrated Systems Nanofabrication Cleanroom (Yablonovitch)
- Molecular Screening Shared Resource (Bradley)
- Nano and Pico Characterization (Gimzewski)
- Quantum Information Research (Jiang)
- Macro-Scale Small Animal Imaging (Weiss)

Les centres de recherche partenaires disposeront de locaux dans le bâtiment. Il s'agit pour la plupart de structures associant de nombreux participants universitaires ou industriels travaillant en réseau. Un espace est également réservé à l'accueil d'entreprises. Les partenaires du CNSI sont les suivants :

- Center for Reticular Materials Research (Yaghi/Kaner)
- Nano Renewable Energy Center (NREC) (Yang)
- Nanotoxicology Research & Training Program (Nel)



- Western Institute of Nanoelectronics (Wang + CNSI Members)
- Functional Engineering & NanoArchitectonics (FENA) (Wang + CNSI Members)
- Center for International Science, Technology & Cultural Policy (Darby/Zucker)
- Institute for Digital Research & Education

Un de ces centres/réseau nous a été présenté plus en détail : il s'agit de FENA (Functional Engineering & NanoArchitectonics, <http://www.fena.org/>), dédié à la recherche dans le domaine de la micro électronique "beyond CMOS" à l'horizon 2020 (qui mériterait à lui tout seul un rapport spécifique). Il associe 15 universités (une centaine de chercheurs), réparties sur tout le territoire américain. Le financement (7 M\$ en 2006) est à la fois gouvernemental (DARPA en particulier) et industriel (HP, Intel, Microsoft...). Les 13 compagnies partenaires ont un accès à la propriété intellectuelle générée par le FENA. Ce mode d'organisation en réseau vise à être plus souple et réactif que les gros centres de micro-électroniques (IMEC, LETI).

Les thèmes de recherche développés sont les suivants:

- Atomic and Molecular Functional Materials
- Nano Structures and Patterns
- Modeling, Simulations and Computations
- Novel Heterogeneous Nanodevices
- Nanoarchitectures

Même si une partie de la recherche est très amont, un des objectifs est de générer au profit des industriels partenaires une visibilité sur les avantages et inconvénients des multiples solutions explorées...

Le mode de fonctionnement de l'ensemble (et en particulier le financement du fonctionnement du CNSI) ne semble pas encore fixé, montrant, s'il en était besoin, l'optimisme volontariste des fondateurs du centre. La visite d'un bâtiment encore vide et en travaux ne nous a en tout cas pas permis de nous en faire une idée claire. Le modèle serait celui d'un hôtel à projets accueillant des recherches nouvelles pour une durée maximale de 5 ans.



Vues d'artiste du CNSI à Los Angeles

crédits D. Lundberg, CNSI Los Angeles

## CALTECH

*Mercredi après midi, séminaire. Rédacteurs : Emmanuel Hadji, Christian Seassal*

Le California Institute of Technology (CALTECH) est une université privée située à Pasadena (à environ une heure de route de Los Angeles). Cet institut ne fait pas partie du système « UC » - University California, contrairement à UCLA, UCSB ou UC Berkeley et sa taille est plus modeste que ces dernières (environ 2000 étudiants).

Le département que nous avons visité à CALTECH est le Center for Science and Engineering of Materials. Celui-ci regroupe plusieurs thématiques :

- Ferroelectric materials and photonic materials (Prof. Atwater et Scherer)
- Advanced structured metals
- Biomaterials
- Methanol for fuel cells
- Spin and charge transport in organics

CALTECH héberge aussi un des trois Kavli Nanoscience Institutes (KNI) centré sur la nanophotonique et la biologie, les deux autres étant Cornell (Bio & health care) et TU Delft (nanoscale electronics). Les KNI ont été fondés par messieurs Moore et Kalvi à partir d'une donation de 20 M€ de la fondation Moore et 7M€ de la fondation Kalvi. Pour l'anecdote, on retiendra que monsieur Moore a conditionné sa donation au fait que le centre ne porte pas son nom. Les moyens de la fondation Kalvi doivent entre autres permettre de créer une salle blanche de quelques centaines de mètres carrés. Cette salle blanche devrait regrouper les moyens technologiques déjà présents à CALTECH mais dispersés dans les différents groupes. Les principaux équipements seront : 2 FIB Nova 600, 1 SEM Quanta 200, 1 deep RIE, 1 RIE ICP Métal, 1 EBeam PG 5000+, 1 PECVD Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 1 AFM bio, STM, SEM, ....

Cette salle sera sous la responsabilité du Prof. A.Scherer et ses procédés devront être compatibles avec une salle utilisant la filière CMOS de sorte que des plaques pourront transiter d'une salle à l'autre suivant les étapes du procédé.

Enfin notons que le CALTECH, ou du moins les profs. Atwater et Scherer revendiquent le « Small but powerfull » et l'on ressent que la proximité de « grosses universités induit une certaine « pression » sur ces derniers.

### **Harry Atwater**

Le groupe du prof. Atwater intervient dans les domaines suivants :

- photovoltaïque à couches minces
- nanocristaux semiconducteurs
- films minces d'oxydes ferroélectriques actifs
- plasmonique, matériaux et composants nanophotoniques

Le prof. Atwater nous a présenté ses développements de structures combinant des couches minces de perovskites ferroélectriques et des micro-nanostructures métalliques. L'idée est d'appliquer à de tels objets une tension électrique, ce qui provoque une évolution de leur réponse optique, exacerbée par la non linéarité de la dispersion. Plus précisément, le Prof. Atwater a présenté des composants électriquement accordables et constitués de couches minces de BaTiO<sub>3</sub> transférées sur une couche de faible indice de réfraction, et sur lesquels un réseau métallique périodique est réalisé.

De manière plus générale, ce groupe étudie des structures plasmoniques et des métamatériaux afin de réaliser :

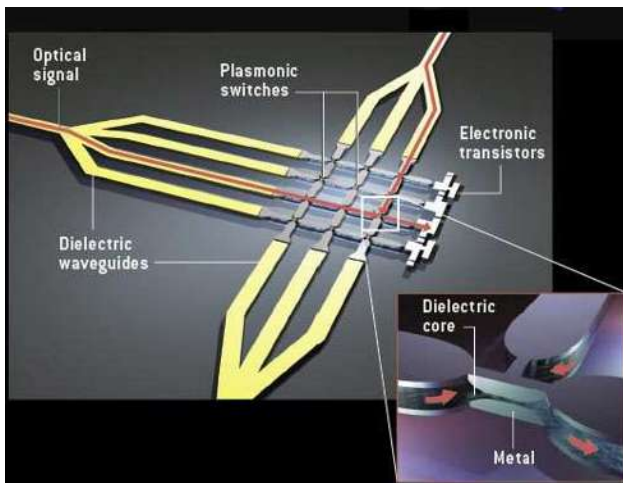
-De l'ingénierie d'indice de réfraction (positif ou négatif)

-De la modulation « plasmonique »

-L'exacerbation de l'émission de la lumière grâce aux plasmons.

En terme de structures plasmoniques, cette équipe se concentre ainsi sur de l'ingénierie très locale plutôt que sur le transport ou le traitement de l'information sur des longues distances, objectif bien plus risqué étant donné l'absorption de la lumière dans les structures métalliques. Citons aussi le développement de « slot waveguides » permettant d'obtenir des indices de réfraction négatifs, ou encore des « switches » optiques qui peuvent être activés en utilisant des énergies aussi faibles que 400 aJ. Le groupe envisage la réalisation d'un « routeur plasmonique » ou « plasmonster », qui se présente sous la forme de réseaux métalliques dont les nœuds pourraient être ouverts ou fermés à volonté, et qui permettant de réaliser un routage de l'information optique dans un réseau de guides d'onde en SOI.

Concernant les effets d'indice négatif, le groupe d'Atwater vient de reporter (voir science express, mars 2007) l'obtention d'un indice compris entre -5.14 et -1.31 aux longueurs d'onde visibles.



Crédits: H. Atwater, Scientific American

Cette image est tirée du numéro d'avril de la revue Scientific American, dont la couverture est dédiée aux travaux d'Harry Atwater sur la plasmonique. Elle montre un prototype de circuit logique où les transistors CMOS seraient remplacés par composants plasmoniques à 3 terminaux appelés 'plasmonsters'. Le cœur de ces composants est un guide plasmonique à fente ('slot waveguide'), ne mesurant pas plus de 20nm d'épaisseur, et où un diélectrique se trouve pris en sandwich entre deux couches métalliques. Un tel guide permet la propagation d'ondes plasmoniques sur plusieurs dizaines de microns, avec des longueurs d'onde diminuées d'un facteur 13 par rapport au vide. Le principal intérêt d'une telle structure logique tient dans sa vitesse d'horloge : qu'on pense à la fréquence de la lumière visible (environ 400 000 GHz) par rapport aux fréquences des circuits électroniques actuels qui ne dépassent pas quelques GHz.

## Axel Scherer

Le groupe du prof Scherer est à l'origine de nombreux développements sur les cristaux photoniques notamment en ce qui concerne la réalisation de lasers. Il a axé ses recherches sur la maîtrise des réalisations technologiques et semble aujourd'hui travailler au croisement de ces objets avec des fonctions de microfluidique. Un accent systématique est porté sur la recherche d'application des effets observés et en particulier les systèmes associant cristaux photoniques et microfluidique sont utilisés pour des aspects environnementaux ou biologiques. Il faut aussi noter que les techniques de type nanoimprint sont largement mises en œuvre et devraient permettre d'envisager des réalisations à bas coût en cas de futur industriel.

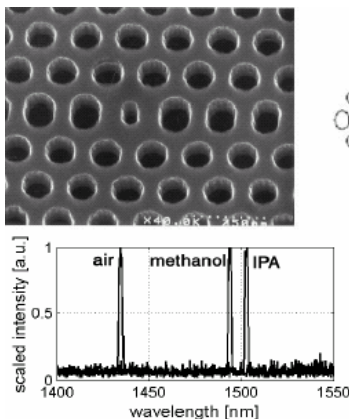
Parmi les développements récents, et fondés sur des concepts à présent relativement matures en micro-nano-photonique, citons la réalisation de lasers à cristaux photoniques (PC) et à micro-disques (diamètre de 0.6 à 1.6µm) émettant dans le domaine visible (680nm), et réalisés en InGaP. La réalisation d'autres structures de détecteurs résonants à PC est aussi évoquée. Une idée directrice

consiste à exploiter la sensibilité de la longueur d'onde de résonances de telles structures à la présence d'un agent extérieur (comme un liquide ou un gaz). Cette idée peut être à la base du développement de différents types de capteurs. Un microlaser à colorant réalisé en microfluidique permet de générer 1μW, puissance suffisante pour certaines applications de type biologie, constituant ainsi un élément d'un laboratoire sur puce.

A. Scherer a également présenté certaines des activités développées pour la société Luxtera autour des interconnexions optiques. On citera notamment la réalisation, de modulateurs électro-optiques fonctionnant à 20Gb/s et exploitant des interféromètres Mach-Zehnder en SOI et la réalisation de photodétecteurs en Ge à faible capacité opérant également à 10Gb/s. En ce qui concerne les sources laser, ce sont des approches de lasers DFB qui ont été avancées, mais qui permettent d'atteindre l'émission verticale en exploitant des tranchées à 45° dans le guide d'onde. Notons que pour le futur, Luxtera envisage de proposer des solutions permettant de traiter des signaux de 100Gb/s.

Un certain nombre d'autres études et développements plus ou moins récents ont aussi été présentés, parmi lesquels des développements de VCSELs, la réalisation de LEDs à haute extraction lumineuse et assistés par des plasmons, et des modulateurs optiques rapides (soit à commande électrique (1mV) sur un polymère entre deux guide d'onde, soit à commande optique dans une géométrie Mach Zehnder (potentiel pour atteindre 2THz). Finalement, l'intégration de photonique, microfluidique et électronique conduit à des systèmes miniaturisés permettant la détection d'agent pathogènes.

En résumé, l'approche d'A. Scherer est toujours très pragmatique et très souvent à visée applicative. Le mot-clé est assurément *intégration* : il s'agit d'intégrer des fonctions ou des systèmes hétérogènes. Son approche vise aussi souvent à combiner la technologie CMOS à d'autres technologies a priori peu compatibles.



Membrane suspendue formant un cristal photonique 2D qui résonne à une fréquence laser. Le maximum du champ de cette résonance se trouve au niveau d'un trou central de dimensions nanométriques où l'intensité lumineuse est alors très importante. La membrane peut être immergée dans divers liquides ou polymères, ce qui modifie sensiblement la longueur d'onde d'émission du laser. Le dispositif constitue ainsi un spectromètre femtolitres.

Crédits: A. Scherer, Caltech.

## ATELIER A UCSB

*Jeudi matin. Rédacteurs : Jean Yves Duboz , Christian Seassal*

Le campus de Santa Barbara, idéalement situé au bord du Pacifique, nous accueille pour un atelier de présentation croisée des résultats scientifiques, un aperçu général de l'organisation du CNSI-UCSB et une visite de laboratoires et de la salle de technologie.

Evelyn Hu sera notre hôte pour cette journée qui s'est avérée parfaitement organisée. La matinée est entièrement consacrée à des présentations scientifiques

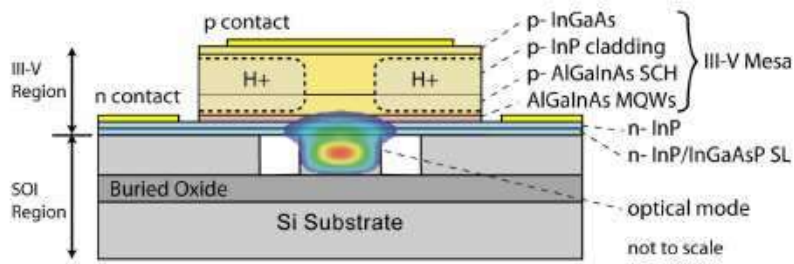
### **Matt Sysak**

*Groupe de John Bowers*

Le premier exposé de UCSB est donné par Matt Sysak, qui fait partie du groupe de John Bowers. Ce groupe compte une dizaine d'étudiants en thèse et 5 post doc, et travaille sur des sujets variés mais tous centrés sur les communications optiques. L'exposé porte sur la photonique sur silicium et les communications cohérentes.

L'intégration sur silicium repose ici sur le report par collage de composants actifs réalisés en matériaux III-V sur du silicium par l'intermédiaire d'une couche de silice. Point particulier, la silice est obtenue par plasma et l'ensemble de la fabrication se fait à basse température (inférieure à 300°C) ce qui garantit l'intégrité des composants III-V moins robuste que le silicium aux traitements à haute température. Par collage d'un laser de type ruban sur un guide d'onde silicium (voir Dossier Science Physique Etats-Unis de février 2007), le mode centré dans la partie III-V arrive à se coupler suffisamment avec le guide sous-jacent pour se propager dans le silicium. Evidemment l'efficacité différentielle externe (1.6%) est réduite par rapport au laser III-V classique (où l'on mesure fréquemment des valeurs supérieures à 50%). La puissance de sortie est réduite dans les mêmes proportions, alors que le courant de seuil est augmenté à 65mA. Ce genre d'approche amène forcément à un compromis : un fort couplage entre la zone active et le guide Si favorise l'efficacité et la puissance mais au détriment du courant de seuil. Du côté technologie, l'approche paraît assez robuste puisque 27 lasers sur 36 fonctionnent avec un seuil inférieur à 70mA.

La seconde partie de l'exposé porte sur le projet Phorfront dont l'objectif est de réaliser des liens optiques à modulation de phase cohérente et très linéaire. L'idée est la suivante. Pour des liens optiques analogiques, la modulation d'amplitude est limitée en dynamique (en particulier le zéro est limité à 10dB), alors que la modulation en phase ne l'est pas. En revanche, le récepteur est plus compliqué à concevoir dans ce dernier cas. A partir d'un laser source, on crée le signal modulé en phase. La nouveauté arrive maintenant : un faisceau issu de ce même laser passe dans un modulateur de contrôle, et est mélangé avec le signal via un coupleur. Une paire de détecteurs est installée sur les deux bras de sortie et leur mesure est couplée par une boucle de rétroaction rapide au modulateur de contrôle. Géographiquement, le laser source est donc placé proche du détecteur et le faisceau laser fait un aller retour jusqu'au modulateur qui y inscrit le signal. Au final, on montre qu'une bonne partie des non linéarités peut ainsi être éliminée. Ce projet, pas fondamentalement nanophotonique, est soutenu par la DARPA et est mené en interaction avec le groupe de Larry Coldren, transition naturelle à l'exposé suivant.



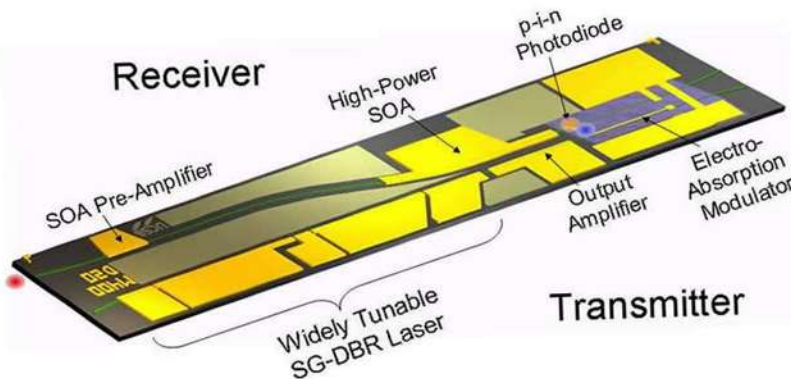
Structure du laser hybride InP sur Silicium développé par le groupe de John Bowers en collaboration avec Intel. Le mode laser est concentré principalement dans le guide d'onde silicium.

Crédits John Bowers, UCSB

### Larry Coldren

Le groupe de Larry Coldren regroupe une quinzaine d'étudiants. Il dispose de réacteurs MOCVD et MBE pour la croissance de composants III-V pour la photonique. Les éléments présentés ne sont pas purement dans le domaine de la nanophotonique, mais plutôt dans celui des télécommunications optiques. L'ajustement de la longueur d'onde des composants est un point important. L. Coldren nous a expliqué comment la création de défauts par implantation ionique proche de la zone active (mais pas dedans) peut permettre d'atteindre lors du recuit ultérieur une variation de la longueur d'onde pouvant atteindre 120nm. Les étapes de gravure, de re-croissance par épitaxie locale ou non sont visiblement largement maîtrisées et permettent de réaliser des combinaisons d'une richesse infinie, et conduisant à une intégration record (largement monolithique) de composants III-V : on arrive ainsi à intégrer un laser, un amplificateur, un modulateur et un détecteur, pour réaliser des transducteurs avec conversion de fréquence possible (any input, any output). Le tout fonctionnant à des fréquences jusqu'à 40Gbits/s. Ces composants étant très techniques et assez peu nano, nous laissons les lecteurs désireux d'en savoir davantage lire les publications facilement accessibles via le site web de UCSB.

Du côté des VCSELs, il faut d'abord signaler l'arrêt des projets VCSEL à 1.55µm (probablement lié à la crise des télécommunications). En revanche, les projets sur les VCSEL à 980nm continuent pour des applications communications à courte distance (inférieure à 1m, possiblement entre composants électroniques). Le confinement de courant par une couche arséniure oxydée permet d'atteindre de seuils faibles (0.1mA) et un rapport bande passante sur puissance dissipée (figure de mérite importante pour un composants rapide et peu gourmand en énergie) de 12GHz/mW, ce qui constitue une valeur record.



Exemple de composant intégré fabriqué dans le laboratoire du prof. Coldren, et utilisé pour les télécommunications optiques. Bien que peu nano, ce type de composant impressionne par sa technicité et son très haut degré d'intégration.

Crédits : L. Coldren, UCSB

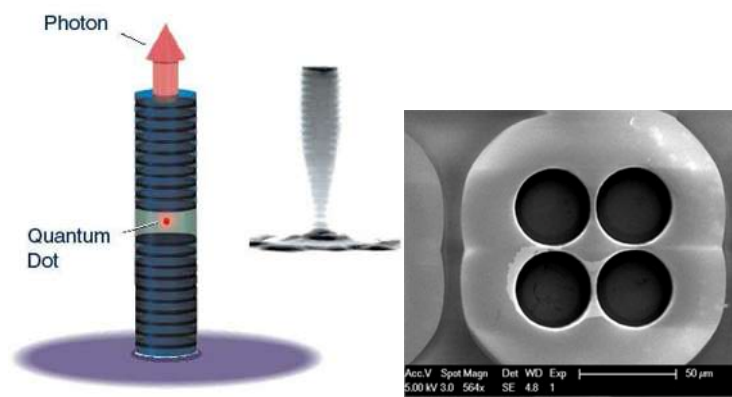
## Daniel Blumenthal

L'exposé suivant, de David Blumenthal est entré encore plus avant dans l'ingénierie télécom. Là encore, l'équipe est composée d'une dizaine de personnes (6 PhD, 4 undergraduate, 1 permanent en soutien). D. Blumenthal dirige le projet LASOR (18M\$ sur 5ans) financé par la DARPA sur des commutateurs et routeurs tout optiques. Sans entrer dans les détails, on soulignera juste la prouesse technique qui consiste à intégrer entièrement sur une surface de  $0.6 \times 6 \text{ mm}^2$  un transducteur entier (any input-any output) travaillant à 40GHz.

## Pierre Petroff

L'exposé suivant de Pierre Petroff nous a rapproché de thèmes plus strictement nano. Utilisant la MBE, P. Petroff travaille sur les nano-objets (boîtes quantiques arséniures notamment) depuis de longues années. On se souvient notamment de la résolution des états s et p d'une boîte quantique InAs par mesure CV dans une diode Schottky arséniure. Aujourd'hui, il associe ces nanostructures à des structures photoniques telles que des cristaux photoniques (PC), des microdisques ou des micropiliers. Les boîtes quantiques dans un PC révèlent un effet Purcell énorme (transition radiative  $\times 40$ ). Ceci est mis à profit pour réaliser un nanolaser pompé optiquement de seuil très bas (124nW). La position exacte des boîtes dans le PC est un point important, mais qui s'avère non critique pour cette application. Il le sera en revanche pour une autre application qui sera détaillée plus loin. Illustrant les possibilités de structurer des objets complexes à 3 dimensions, P. Petroff épitaxie des fils quantiques  $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$  de 40 nm sur des boîtes quantiques InAs, terminés par une boîte quantique InAs. Cet objet permet de séparer verticalement (sur 10 nm) l'électron et le trou d'une paire créée optiquement. Un point important lorsque l'on veut intégrer un émetteur fin spectralement dans une structure optique de fort Q est l'accord en fréquence. Une possibilité est d'utiliser les contraintes mécaniques dans une membrane mobile pour accorder le mode optique d'un PC et la boîte quantique. Plus original que les piliers classiques, P. Petroff réalise des nano-piliers par confinement optique entre 4 trous. Cette structure lui a permis d'observer l'émission de photons uniques jusqu'à une fréquence de 3MHz. On reste loin bien sûr des 40Gbit/s des communications non quantiques, mais les progrès sont notables.

Signalons pour finir que P. Petroff travaille aussi sur la spintronique, notamment dans les boîtes arséniures avec du manganèse, mais ce sujet ne fut pas abordé.



Structure expérimentale d'émetteur à photon unique. La zone centrale définie par les quatre trous gravés (image de droite) contient une boîte quantique émettrice unique, et reproduit le confinement apporté par un micropilier (image de gauche), et apporte un contrôle de la polarisation.

Crédits Pierre Petroff, UCSB

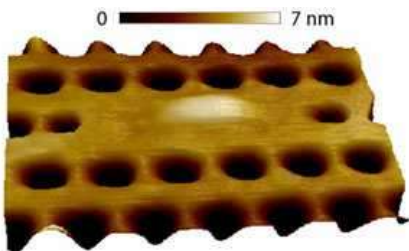
## Evelyn Hu

Le dernier exposé à UCSB fut celui de Evelyn Hu. Evelyn Hu s'occupe plus particulièrement de la fabrication des nano-objets et travaille en collaboration avec les chercheurs précédents : on a retrouvé ainsi une partie des thèmes abordés précédemment. On peut compléter le panorama en ajoutant des microdisques GaN avec des puits quantiques InGaN ayant permis de mettre en évidence un effet laser par pompage optique avec une densité de  $300\text{W}/\text{cm}^2$  seulement. Toujours dans les nitrures, des cristaux photoniques sont réalisés. C'est un axe plus récent, visant une gamme de longueur d'onde plutôt dans le visible - proche UV, ce qui a des applications importantes notamment, mais pas uniquement, en biologie. Toujours dans le visible, mais du côté du rouge, à  $640\text{nm}$ , les centres colorés du diamant sont utilisés en émetteurs fins dans des cavités de PC et ont permis de mesurer des facteurs de qualité de 500. Dans les arséniures, E. Hu est revenu sur le challenge de localiser précisément une boîte quantique dans un PC pour la situer dans un ventre du champ électromagnétique. Pour l'instant, la technique consiste à la localiser par microscopie à force atomique et dessiner le PC autour. C'est par cette technique qu'elle est parvenue à montrer le couplage fort et l'émission de photons uniques avec une boîte quantique InAs dans une cavité de PC de type L7 (Nature 445, Février 2007).

Evelyn Hu a ensuite décrit le CNSI de UCSB. A notre question sur l'appartenance multiple des chercheurs à une faculté et au CNSI et le possible grand écart thématique que cela pouvait induire, E. Hu nous a rassuré : le CNSI n'est là que pour faciliter les collaborations et permettre aux chercheurs de faire la recherche dont ils ont envie de la meilleure façon possible. Le CNSI de Santa Barbara est multidisciplinaire mais se focalise un peu sur la spintronique. Le CNSI regroupe aussi de la biotechnologie (plusieurs M\$ de contrats de l'US Army), du calcul quantique, de la sociologie pour étudier l'impact sociétal des nanotechnologies, et un centre Media Art (projection d'image 3D d'objets sur une grosse sphère permettant de se promener virtuellement dans l'environnement d'un nano-objet).

A l'université de Santa Barbara, les capteurs d'énergie solaire ou encore l'éclairage par DEL nitrures blanches font partie des thèmes qui rappellent que la Californie n'est pas en retard sur les thèmes écologiques actuels. Le « Center for Nanoscience Innovation for Defense » rappellent enfin que l'écologie n'est pas l'unique préoccupation non plus, doté d'un budget de 15M\$ par an pour 3 universités, dont UCSB est la plus grosse bénéficiaire. Le projet WIN en liaison avec Stanford a déjà été évoqué, ainsi que FENA.

Il est évidemment difficile de connaître les budgets de chaque équipe. On peut cependant s'en faire une idée à partir du budget recherche du département (Electrical and Computer Engineering) et de sa taille. On arrive alors aux chiffres suivants : en moyenne, une équipe est constituée autour d'un professeur, un autre permanent en soutien technique, une petite dizaine d'étudiants en thèse, et des post docs, auxquels s'ajoutent des étudiants en master (undergraduate), et dispose de 500k\$ par an. C'est évidemment une moyenne, et il est vraisemblable que les équipes travaillant sur les aspects matériaux aient un budget supérieur à cette moyenne.

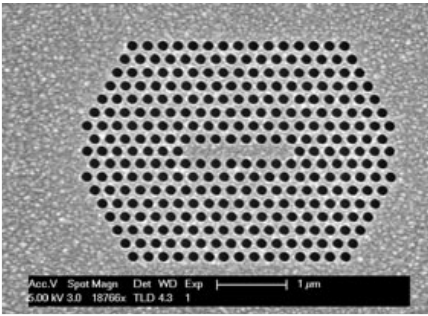


Deux exemples de travaux effectués dans le groupe d'Evelyn Hu.

(Haut) Couplage d'une boîte quantique unique avec une nanocavité délimitée par un cristal photonique bidimensionnel. Le couplage est si bon que le régime de 'couplage fort' a été observé, où un photon et un exciton (paire électron-trou liée) sont hybridés en un état de 'polariton'.

(Bas) Parmi le grand nombre de défauts que l'on trouve dans la structure cristalline du diamant, le défaut appelé 'Nitrogen





Vacancy' (NV) est très étudié. Il se trouve qu'il émet des photons uniques et possède un spin a longue durée de vie. L'objectif du groupe d'E. Hu est de coupler un centre NV dans une cavité optique de haute qualité, afin d'étudier en détail l'interaction matière-rayonnement de ce système quantique très prometteur. Sur cette image une cavité PC a été gravée dans une couche de nanocristaux de diamant.

Crédits : E. Hu, UCSB

*Jeudi après-midi, atelier à UCSB. Rédacteurs : Hervé Rigneault, Jean Louis Oudar*

**Nathaniel Stern** (Groupe de David Awschalom)

*Electrical generation of spin polarization and the spin Hall effect.*

Mr Stern rappelle la possibilité de manipuler les états de spin. Ceci est possible grâce au couplage spin orbite : par effet relativiste, le spin de l'électron qui se déplace dans un champ électrique voit un champ magnétique effectif qui induit sur lui l'effet habituel de précession. En réalisant des champs électriques importants à l'aide de nanotechnologies on va pouvoir utiliser cet effet (dit aussi effet Rashba) de façon très efficace. Mr Stern présente ensuite les développements récents en spintronique consistant à manipuler le spin des électrons dans différents types de semiconducteurs. Il montre en particulier que l'observation de l'effet Hall de spin (production d'un pur courant de spin sans courant de charge, validation du mécanisme prévu théoriquement par Dyakonov en 1971) permet d'imaginer une nouvelle logique consistant à séparer et router le spin électronique sur une puce. Le développement d'une technique de microscopie à balayage par effet Kerr a permis d'obtenir une imagerie des états de spin, de leur diffusion et de leur accumulation. L'effet mesuré dans le GaAs à 70K a pu être observé jusqu'à 300K dans le ZnSe.

**Stacia Keller**

*GaN based materials LED*

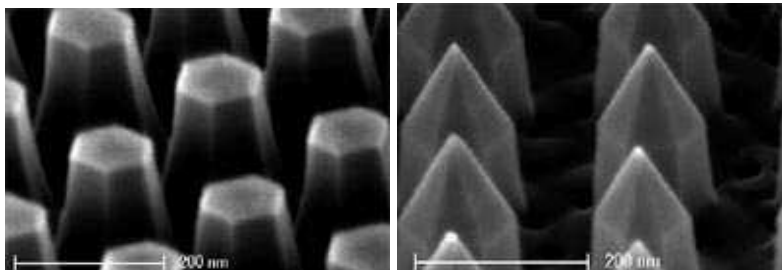
*(rédacteur J.Y. Duboz)*

Stacia Keller nous a brossé un panorama des activités de UCSB sur les nitrures, GaN, AlN, InN et alliages dérivés. Cette activité mondialement renommée repose sur plusieurs professeurs qui y travaillent spécifiquement (Steven Den Baars, Jim Speck, S. Nakamura, U. Mishra, S. Keller) et d'autres professeurs dans le cadre de collaboration. Une vingtaine d'étudiants gravitent autour de ce pôle qui comprend de la croissance par épitaxie (MBE et MOCVD), de la technologie et des mesures. Les applications visées sont surtout l'optoélectronique (LED et laser) et l'électronique (Transistors HEMT), mais la richesse des nitrures en autorisent d'autres. Divers membres de cette équipe sont fortement impliqués dans le Solid State Lighting Center. Il y a enfin des aspects fondamentaux qui sont étudiés.

S. Keller a tout d'abord rappelé le problème du champ piézoélectrique dans le GaN polaire et les efforts consentis pour développer du matériau non polaire, avec de bons résultats récents : une LED non polaire sur plan m, à 410 nm, d'efficacité quantique externe de 39%, délivrant 24mW à 20 mA, ce qui est proche du niveau des meilleurs LED mondiales polaires qui, elles, sont développées depuis plus de 10 ans. Un laser à 405nm, de seuil 2.2kA/cm<sup>2</sup> a également été démontré.

Le thème du désaccord de maille des nitrures par rapport aux substrats utilisés et les problèmes (dislocations) qui en découlent nous ramènent vers des préoccupations plus « nano ». La structuration avant croissance à l'échelle nano est connue ou pressentie comme une solution au désaccord de maille. Fait nouveau, S. Keller prétend que la nanostructuration post-croissance, peut également réduire la densité de dislocation.

D'autres aspects encore plus franchement nanophotoniques (microdisques, cristaux photoniques) sont étudiés dans les nitrures, et ont fait l'objet de présentation par des orateurs précédents.



N Polar

Ga Polar

Nanopylons formés par croissance de multi-puits quantiques InGaN sur des substrats nano-structurés ayant deux orientations cristallines différentes. Crédits Stacia Keller, UCSB.

### **Félix Mendoza** (groupe de David Awschalom)

#### *Spin dynamics in semiconductor microcavities*

Mr Mendoza utilise des microcavités et des microdisques avec des boîtes GaAs/AlGaAs (ou plus exactement des fluctuations d'épaisseur suffisantes pour localiser des excitons) qui se forment spontanément durant la croissance par épitaxie. Des résultats sont présentés qui illustrent les effets lasers observés dans ce type de nanostructures, avec des facteurs de qualité  $Q$  de l'ordre de 4500.

Les états de spin sont injectés optiquement dans les QW et sont sondés optiquement. On observe la relaxation de l'état de polarisation du spin en fonction du temps. L'effet laser provoque une modification du temps de décohérence  $T_2$  du spin à la résonance de la cavité : celui-ci augmente à proximité du seuil, puis décroît à plus forte puissance de pompe (Ghosh, Nature 5 (2006)). Cette dynamique n'est pas pour l'instant expliquée.

La réunion s'est poursuivie par une visite des laboratoires où sont menées ces activités concernant la dynamique de spin (Mendoza et Stern).

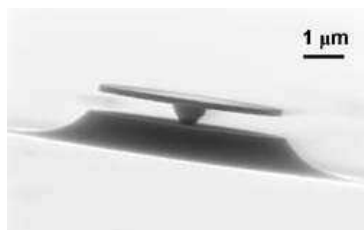
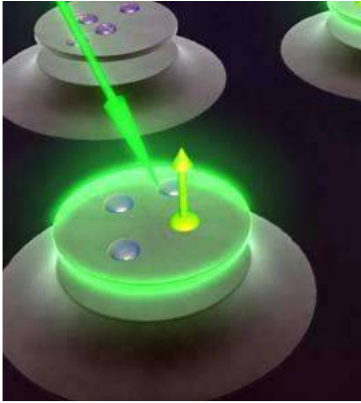


Image par microscope électronique d'un microdisque GaAs de  $4\mu\text{m}$  de diamètre. La zone active mesure  $110\text{nm}$  d'épaisseur et consiste en quelques boîtes quantiques (QD) auto-assemblées au milieu d'un puit quantique.

Crédits : D. Awschalom, UCSB



Une vue d'artiste montre le microdisque avec des boîtes quantiques ré-émettant de la lumière suite à une excitation optique. Cette lumière est ensuite confinée sur la circonférence comme montré par la couleur verte, sous la forme de 'modes de galerie', (whispering gallery modes) ainsi nommés par référence à la Whispering Gallery dans la cathédrale St Paul à Londres.

Crédits : D. Awschalom, UCSB

### Visite de la salle blanche à UCSB

Enfin, Jack Whaley nous a fait visiter les salles blanches du département d'Engineering, qui rassemblent la majeure partie des équipements de nanotechnologie dont dispose l'UCSB. La conception originale de cette salle blanche mérite d'être mentionnée : celle-ci comporte une alternance de couloirs de différents types (couloirs techniques, couloirs utilisateurs), avec des cloisons mobiles de séparation, permettant une reconfiguration en fonction de l'évolution des besoins. Les équipements, répartis sur environ 1000 m<sup>2</sup>, permettent la nanofabrication à haute résolution, avec des équipements classiques de gravure et de lithographie, dont deux steppers et un masqueur électronique de résolution 8nm, des équipements de caractérisation : microscopie électronique, microscope à sonde locale, SIMS, FIB, diffraction X, et caractérisation optique.

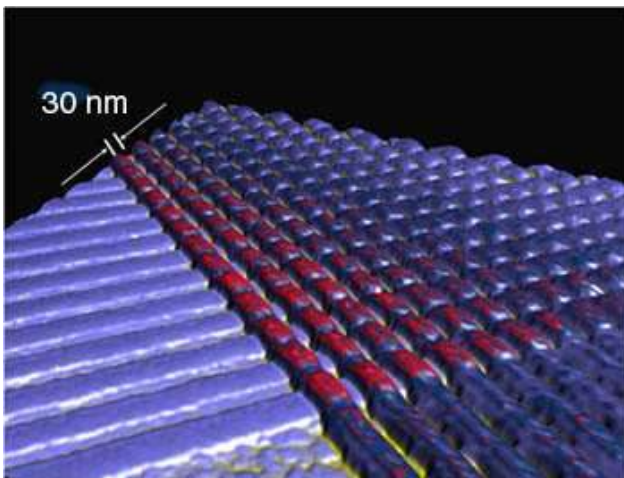
La salle blanche est ouverte 24h/jour et 365jours/an. Elle est « user operated », c'est à dire en pratique que les étudiants font le travail pour un taux horaire de 25\$ (seule la lithographie électronique est plus chère, 110\$), avec une mise de base de 1000\$. Les extérieurs à UCSB peuvent également venir au tarif de 50\$/h, ainsi que les industriels pour 100\$/h. Une équipe de permanents est là pour l'encadrement, maintenance, formation, sécurité. Le coût annuel de cette salle est de 4M\$ pour le fonctionnement auxquels s'ajoute environ 1M\$/an d'investissement sur des équipements lourds.

## HEWLETT PACKARD

*Vendredi matin, visite. Rédacteurs : Vincent Berger, Françoise Lozes*

Stanley Williams est l'un des cinq Senior Fellows aujourd'hui actifs chez Hewlett Packard, entreprise qui compte 40000 personnes aujourd'hui. Il dirige le groupe QSR (Quantum Science Research), laboratoire de recherche amont de HP orienté vers de nouvelles technologies, préparant l'avenir en cherchant les ruptures susceptibles d'aboutir à un horizon typique de 10 ans au moins. On trouve donc ici un laboratoire industriel résolument très amont, qui n'est pas sans rappeler, *mutatis mutandis*, ce que furent les laboratoires Bell ou IBM à une certaine époque. Une politique volontariste très forte incite les chercheurs à constituer des portefeuilles de brevets très solides ; le positionnement sur la propriété intellectuelle accompagnant naturellement la volonté de maîtriser la technologie sur le plan opérationnel. Le nombre de brevets déposés par les chercheurs dépasse sans doute le niveau de la pure créativité, il faut donc voir la politique de dépôt de brevet de HP comme un large positionnement juridique dans les nouvelles technologies bien choisies. En effet, ce positionnement ne part pas tous azimuts non plus. On garde le souci de rester à une distance raisonnable des applications HP (l'ordinateur, l'imprimante), ou dans le cadre des technologies clés de HP (l'impression et le nanoimprint, les MEMS). On va donc tout naturellement mener des recherches intenses sur l'ordinateur quantique (ou les technologies intermédiaires qui y mènent), les interconnexions optiques, ou encore les capteurs, pour ce qui concerne la photonique. Deux anecdotes finalement pour illustrer cette politique de propriété intellectuelle : Le portefeuille de brevets déposés par Stanley Williams a été désigné par le magazine Small Times le meilleur portefeuille au monde sur les nanotechnologies ; d'autre part le QSR dépose 80 brevets US par an (pour moins de 80 chercheurs !), dont la plupart sont étendus dans un pays européen et un pays asiatique dans l'année.

Le QSR compte 65 personnes, 80 d'ici la fin de l'année, dont 20 en photonique. Il n'a pas été touché par la vague récente de réduction des effectifs. La moitié du personnel est permanent, le reste se divise en post docs (12), professeurs en visite, et staff technique. On ne prépare pas de thèse ici, comme on ne le faisait pas non plus aux Bell Labs il y a quinze ans. Le financement repose sur un « impôt » payé par les composantes de HP pour la R&D, sur un modèle classique pour les très grandes entreprises technologiques. Il n'y a donc pas de très grande originalité dans l'organisation de QSR et ses principes de base. En revanche, ce qui frappe c'est le niveau amont de la recherche, la politique très offensive de brevets, et la grande cohérence de cette recherche avec le corpus industriel et technologique de HP. L'esprit et la fierté de l'entreprise sont également très présents.



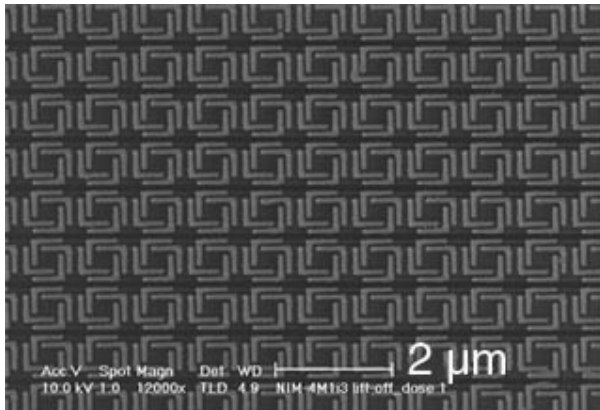
La technique du 'nanoimprint' a été développée très tôt chez HP, et constitue une composant essentielle de ses travaux en nanoélectronique et même nanophotonique. Cette image de microscope électronique montre une mémoire 66x66 de 4kb réalisée par nanoimprint en 2004. L'épaisseur des traits est ici de 30nm. En 2006, elle est passée à 17nm sur un autre composant, ce qui place HP une dizaine d'année en avance de la feuille de route de l'ITRS. Le nombre de composants réalisés à partir d'un moule connaît également une croissance importante : 1 en 2002, 64 en 2003, 1000 en 2004 et 16 000 en 2005. L'industrialisation n'est plus si lointaine. Crédits : S. Williams, Hewlett Packard.

En ce qui concerne la nanophotonique, on peut dégager deux axes de recherche : les méta matériaux, plasmons et cristaux photoniques d'un côté, l'information quantique de l'autre. Les MEMs et le nanoimprint, côté maîtrise technologique, sont deux éléments clés chez HP : le souci de la compatibilité entre la recherche fondamentale et la fabrication future dans le cadre de l'une de ces technologies apparaît très en amont. C'est là un point essentiel. En effet, de nombreuses recherches amont se poursuivent habituellement parfois très longtemps, en descendant le cours des démonstrations fondamentales vers les performances d'un dispositif, sans se préoccuper des contraintes de fabrication finales si un dispositif industriel doit être développé. Ici, chez HP, au contraire, la préoccupation de la réalisation d'un dispositif (par HP !) apparaît au contraire dès la prise de brevet, que l'on préfère orientée vers un process que vers un concept.

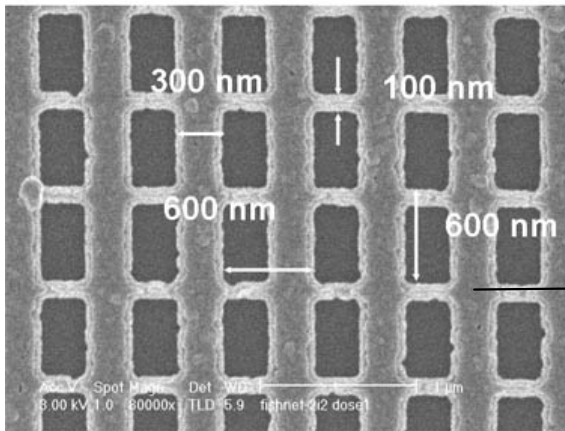
Prenons un exemple : les techniques SERS d'accroissement de la fluorescence Raman par l'interaction avec une nanoparticule métallique (et l'utilisation d'une résonance plasmon sur un point chaud (« hot spot »)) sont vieilles de plus de 20 ans dans les concepts et leur utilisation dans les labos de recherche. Leur développement industriel n'est pas facile : l'emplacement des hot spots dépend du hasard des dépôts de nanoparticules, de la distance entre elles, de leur forme ou leur orientation, sans que tout cela soit vraiment compris. Dans le laboratoire, un doctorant peut toujours chercher un quart d'heure sur son substrat le point chaud qui va lui donner une belle fluorescence et une belle publication. D'un point chaud à l'autre, la luminescence peut varier par plusieurs ordres de grandeur ! Pour un développement industriel, en revanche, il faut que tout de suite le substrat fonctionne, avec des performances à un certain niveau de performances spécifiable, peut être pas au maximum des performances, mais en tout cas à un niveau obtenu à coup sûr, de manière homogène et reproductible. La recherche chez HP sur la nanoplasmonique vise précisément à lever cette difficulté en réalisant par nanoimprint des nanoparticules métalliques homogènes, contrôlées, reproductibles. Ils parient même qu'en partant de ce pré requis d'une technologie de fabrication stabilisée, ils vont réussir à comprendre ce qui se passe dans ces nanoparticules et l'accroissement de l'effet Raman, beaucoup mieux qu'en regardant des points chauds au hasard d'un dépôt brownien, et donc qu'en retour la compréhension fondamentale de ces interactions (qui constitue un sujet de recherche amont très intense actuellement) va être facilitée. Cet exemple montre que la progression de la capacité de fabrication, avec toutes les qualités que l'on demande (bas coût, reproductibilité, contrôle...) peut aller de pair avec le niveau de la recherche amont. On pense pourtant souvent le contraire : on imagine le développement comme une phase strictement ultérieure à la recherche fondamentale. HP montre que dès son initiation, la recherche fondamentale peut intégrer et même bénéficier des soucis d'applicabilité. Cela semble être très fortement intégré dans l'esprit de recherche au QSR.

Côté techno et donc, plasmonique, des lignes métalliques de largeur aussi faibles que 6nm sont démontrées par imprint, également des moyens de réaliser des nanoimprints avec plusieurs niveaux (ce qui reste aujourd'hui un challenge technologique fort), ou encore des structures métalliques quadrillées à l'échelle nanométriques (les « fishnet » structures, littéralement les « filets de pêche »). Cette dernière structure peut permettre de réaliser des matériaux main gauche à bas coût, et HP aurait récemment démontré ainsi une lentille de Veselago (c'est-à-dire une lentille avec un matériau d'indice négatif, permettant en principe de focaliser la lumière au-delà de la limite de Rayleigh). La réalisation de ce type de lentille par une structure 2D seulement (sans disposer d'un matériau d'indice négatif en volume) pose en principe problème, mais ces aspects sont en cours de réflexion et de développement. Comme nous l'avons dit précédemment, la techno nanoimprint permet également de fabriquer des substrats réguliers, homogènes, et reproductibles, contenant des points chauds du champ électromagnétique par résonance plasmonique sur des nanoparticules métalliques. Le but est de développer une technologie fiable de capteurs ou senseurs, pour les applications de spectroscopie sur

des très faibles volumes. Le champ potentiel d'applications est large : chimie, biologie, médecine, génétique.

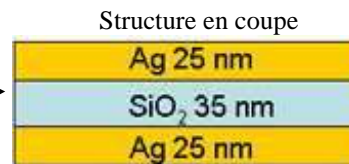


**SEM Image of "Fishnet"**



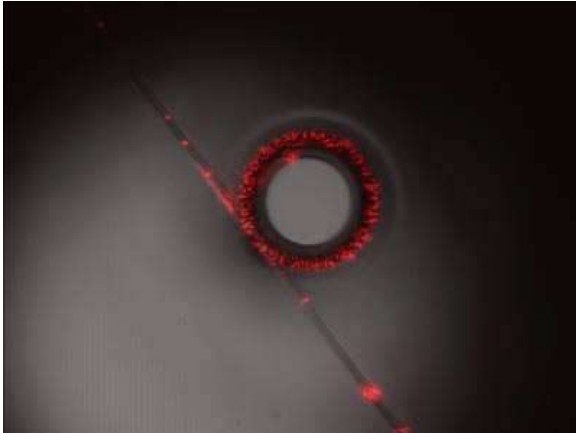
Exemples de métamatériaux fabriqués dans les laboratoires HP. Ces matériaux 'main gauche' possèdent des propriétés électromagnétiques qui n'existent pas dans la nature. Ils permettent entre autre d'envisager la fabrication d'une 'lentille de Veselago', qui serait une lentille parfaite s'affranchissant de la fameuse limite de diffraction de Rayleigh.

L'image du bas montre une structure appelée 'fishnet', formée d'un réseau de fils entrecroisés obtenus par nanoimprint (la section est montrée ci-dessous). Ce type de structure a permis d'obtenir récemment la mesure expérimentale d'un indice de réfraction négatif à la longueur d'onde télécoms  $1.55\mu\text{m}$  :  $n \sim -1$ .



Côté information quantique, les systèmes simples où un bit quantique unique est manipulé dans une microcavité sont étudiés. La recherche du meilleur candidat (centres colorés du diamant, spin, ions) est encore ouverte, en fonction des contraintes conflictuelles sur la perte de cohérence, et les possibilités de couplage avec le monde macroscopique. Ce type de recherche s'inscrit normalement dans le reste d'une communauté académique très importante sur ce type de sujet très à la mode. Des recherches un peu plus originales sont également menées sur des non linéarités à des très faibles niveaux de lumière dans des fibres étirées, au sein desquelles le champ évanescant interagit avec des atomes de Rubidium. Un tel dispositif peut s'inscrire dans la boîte à outil des composants utiles dans la construction d'un hypothétique ordinateur quantique. La fabrication d'un générateur de nombres aléatoires quantique (on rappelle que le hasard, le vrai, n'existe strictement que dans le cadre de la physique quantique) présente l'intérêt d'offrir un composant déjà réalisé, simple (il n'utilise qu'un bit quantique), et donc permet peut être d'amorcer un marché de l'information quantique, permettant ensuite d'enclencher le cercle vertueux du marché – R&D – nouveaux composants – nouveau marché, etc... Stanley Williams a rappelé que le transistor lui-même, composant emblématique de l'informatique de première génération (entendons de l'ère pré-information quantique) s'était vendu pendant de longues années comme un composant élémentaire simple, avant de bénéficier des développements technologiques qui ont permis les fabrications collectives des circuits intégrés. Le but est réellement de sortir le plus tôt possible une partie de l'information quantique du laboratoire (où elle souffre de l'image d'une science fiction, et du coût d'une recherche purement spéculative), et de la placer très vite sur le marché, fut-ce modestement.

HP a donc réalisé un générateur de nombre aléatoire à base de paires de photons intriqués, dans cette perspective. On pourrait reprendre la même comparaison avec les détecteurs : les capteurs infrarouge ou même visibles se sont développés pendant de longues années avec des applications comme pixels uniques (capteurs de présence pyroélectriques, capteurs de présence dans les ascenseurs, les télécommandes, avant d'être intégrés comme des matrices de pixels dans les capteurs silicium (appareils photos, vidéo) ou infrarouge (caméra thermiques justement appelées de deuxième génération). Peut être même le développement de l'humanité elle-même suivra-t-elle le même chemin, en ayant pendant des siècles progressé avec seulement des individus uniques (jusqu'au milieu du XXIème siècle) avant de bénéficier de la technologie du clonage génétique et de la fabrication parallèle et contrôlée de grandes quantités d'individus, dans le meilleur des mondes possibles.



Photographie d'un dispositif permettant de coupler un centre NV (voir paragraphe sur Evelyn Hu) à un micro-résonateur. De la lumière laser est injectée dans le micro-résonateur via une fibre optique qui a été étirée à la flamme. Les taches rouges sur l'image sont simplement de la diffusion sur des impuretés diverses. L'objectif du dispositif est de convertir l'information quantique contenue dans le centre NV sous forme de photon se propageant dans la fibre et vice versa.

Crédits : S. Williams, Hewlett Packard.

Le souci d'interdisciplinarité et de mélange des métiers apparaît fortement chez HP, où les chercheurs sont mélangés aux autres types de métiers chez HP dans des bureaux paysagés. Cela complète sur le modèle industriel (mélange vertical des métiers) la politique interdisciplinaire volontariste qui transparissait dans les universités. La plupart des post doc ou des permanents recrutés à HP proviennent des universités environnantes, (avec une source privilégiée de ressources humaines formées à Stanford, pour une raison de proximité géographique), avec lesquelles des liens scientifiques forts sont conservés.

### **III – CONCLUSIONS THÉMATIQUES**

#### **La nano-bio-photonique en Californie (Hervé Rigneault)**

La nanobiophotonique a été présente de nombreuses fois durant cette mission. C'est à Stanford tout d'abord que nous avons vu les travaux de W. Moerner, puis à Berkley à la Molecular Foundry où d'importants moyens ont été déployés pour mettre dans un même bâtiment nanotechnologie et biologie moléculaire. Il est à noter cependant que la Molecular Foundry n'aborde pas du tout le domaine des biopuces qui pourrait relever de ses compétences. A UCLA et UCSB c'est au CNSI que l'on trouve une forte implication des biotech. Il s'agit, entre autres, d'utiliser des matériaux organiques provenant de composants biologiques (ADN, microtubules, virus, polymères...) pour explorer de nouvelles pistes permettant, à terme, de remplacer les technologies semiconducteur inorganiques et diminuer les échelles. A Caltech c'est essentiellement dans l'exposé du Prof Sherer que l'aspect laboratoire sur puce (Lab on chip) est ressorti. Fabriqués à base de polymères, de complexes composants microfluidiques sont développés pour réaliser des tests complets sur puce. On note même une initiative de transfert industriel consistant à proposer une machine intégrée réalisant la PCR (Polymérase chain réaction), une étape nécessaire pour tous les tests ADN.

Globalement, je dirais que tout ce que j'ai vu et entendu est connu et fait l'objet de travaux en France et en Europe. Il n'y a donc pas, à mes yeux, un retard majeur entre notre pays et les USA, par contre l'intégration est beaucoup plus développée aux USA. Les centres de Stanford, Molecular Foundry, CNSI proposent une association tout à fait originale consistant à regrouper dans un même bâtiment biologie, physique, chimie et nanotechnologie. Il me semble que ces initiatives très récentes vont porter leurs fruits dans quelques années sur des sujets transverses en nanosciences. Ces réalisations seront possibles du fait même de l'existence de ces structures interdisciplinaires et des fonds conséquents qui leur sont attachés.

En conclusion, la nanobiophotonique est bien présente en Californie et son activité est clairement sur une pente montante. Si ce sujet était jusqu'alors bien représenté en Europe, il y a fort à penser que les USA vont rapidement s'imposer du fait même de leurs centres interdisciplinaires. De telles initiatives seraient également possibles en France sur des campus qui ont toutes les compétences (Marseille, Grenoble, Orsay...), faut il encore qu'il y ait une réelle politique les encourageant.

#### **Les grandes centrales technologiques (Jean-Yves Marzin)**

Cette visite nous a permis d'avoir un instantané de la recherche dans le domaine de la nanophotonique, mais aussi de découvrir un certain nombre d'infrastructures naissantes, dont les objectifs dépassent largement ce cadre.

Assez généralement sur le thème nanophotonique, les sujets abordés en Californie et en France sont assez similaires et l'impression générale est que nous restons dans la course. Dans certains domaines toutefois, l'avance américaine est évidente. Celui qui m'a le plus frappé est celui des recherches menées par L. Coldren, en particulier son savoir faire sur les circuits intégrés photoniques complexes est impressionnant (plus généralement, est ce que ça ne signifie pas qu'au niveau des idées et concepts nous, en France, pouvons faire jeu égal avec la Californie, mais que lorsqu'il s'agit de passer dans des phases de développement nous sommes vite distancés, une raison pouvant être le manque de lien entre industrie et recherche académique : les premiers ayant peur de se lancer dans des projets trop nouveaux, les seconds n'en ayant pas les moyens. )

Au plan des infrastructures de technologie, on peut constater:



- que tous les établissements visités disposent de salles blanches de 1000 m<sup>2</sup> environ (moins à Berkeley), certaines encore en construction
- que toutes ces centrales sont ouvertes avec une assez grande diversité de fonctionnement (et de financement)

Un cas extrême se trouve à la Molecular Foundry de Berkeley, avec un nombre de chercheurs permanents très limité (une vingtaine de personnes pour le moment) et un modèle de grand instrument:

- projets accueillis après choix par un comité externe
- gratuité
- projets avec accueil (jusqu'à un an) d'équipes ou effectué par les permanents
- permanents consacrant 50% de leur temps aux projets sélectionnés, le reste à leur recherche
- projets nationaux, internationaux ou industriels (non gratuits pour ces derniers)

L'interdisciplinarité y est affichée et volontaire (bio-chimie-physique-observation-nanofab mais aussi théorie). Ce centre, fortement couplé aux centres de microscopie et au rayonnement synchrotron voisins, n'a pas d'équivalent en France.

A l'autre extrême, on trouve le centre de Stanford, plutôt orienté silicium, à l'origine, et où les utilisateurs payent à l'heure d'utilisation (tarifs dégressifs), et où le staff se consacre à la formation et à la maintenance, avec des process assez figés.

Le centre de UCSB fonctionne sur un modèle similaire en étant plus orienté 3-5, avec un paiement à l'heure également, mais un tarif plus faible que celui de Stanford.

Le modèle du centre de UCLA n'est pas encore figé: il semble qu'il fonctionnera comme un hôtel à projets.

Dans tous les cas, l'utilisation des masqueurs électroniques fait l'objet d'une tarification différenciée et il n'y a pas de moyens d'épithaxie de semiconducteurs (hors Si) dans les centrales, principalement dédiées au process.

Dans les 2 centrales visitées implantées depuis assez longtemps (UCSB, Stanford), le nombre d'utilisateurs annuels est de 500 environ, avec une forte composante locale (>50%) et un accès des industriels assez faible (10-20%).

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques de ces différentes infrastructures:

Centrale	Process	STAFF	Surface en m <sup>2</sup>	Mode de sélection des projets	Financement des projets	Type d'accueil
Molecular Foundry Berkeley	Ouvert/ orienté nanosciences	4	500 ?	Comité: faisabilité + intérêt scientifique	Gratuit	Hôtel à projets/grands instruments
Stanford	Si dominant	25	1000	Faisabilité	A l'heure	Personnes
UCSB	3-5 + Si	14	1180	Faisabilité	A l'heure	Personnes
UCLA (ISNC/CNSI)	Ouvert/ orienté électronique	20 à terme	880	Faisabilité	A l'heure (modeste)	Projets

Pour ce qui est des moyens financiers, il n'est pas inutile de donner un ordre de grandeur:

Centrale de UCSB (1000 m<sup>2</sup> environ): 3,5 M\$, salaires de 10 permanents compris, 1 M\$ provient de l'université.

Un des problèmes évident des centrales est de continuer à améliorer les procédés mis en œuvre, surtout avec des permanents dont ce n'est pas la mission (Stanford, UCSB).

Ce Problème et ceux liés à la PI y ont été réglés de façon assez radicale pour la centrale de Stanford: les permanents n'ont pas le droit de signer d'accord de confidentialité et les éventuels process

développés par les utilisateurs sont censés tomber dans le pot commun. Aux dires du responsable de la salle blanche, quelques utilisateurs privés n'acceptent pas ces conditions et vont travailler ailleurs. Il n'en est pas de même à UCSB où les process de base sont développés par les permanents et où les process développés par les utilisateurs ne sont pas communiqués à tous.

Dans ces deux centrales, il n'y a pas de tri des projets hébergés, si ce n'est la vérification de la non contamination des équipements. Elles sont ouvertes 24h/24 et 365 j par an.

Enfin, les quatre centrales visitées sont structurellement indépendantes des universités qui les hébergent et deux d'entre elles sont mitoyennes (dans les mêmes bâtiments) de moyens de chimie et de bio à la disposition des projets hébergés.

## **Nanophotonique et technologies de l'information**

**(Jean-Louis Oudar)**

Concernant les applications de la nanophotonique aux technologies de l'information et de la communication (TIC), ce domaine était présent dans la plupart des laboratoires visités, en particulier à Stanford, au Caltech, à UCSB, et chez Hewlett-Packard.

1. La grosse préoccupation actuelle dans ce domaine d'applications est poussée par l'industrie microélectronique, elle vise à introduire la photonique à un niveau de plus en plus local dans les circuits pour contourner les goulets d'étranglement de l'électronique pure concernant le transfert de hauts débits d'information, d'où le développement particulièrement important des efforts en *photonique sur silicium*. Les exemples les plus remarquables concernent la démonstration de lasers hybrides III-V/Si, issus d'une collaboration UCSB-Intel, la réalisation de modulateurs rapides à effet Stark intégrables sur silicium, à Stanford, les développements du Caltech et de la société Luxtera pour les interconnexions optiques à 50Gb/s, voire ultérieurement 100Gb/s.

2. Par comparaison le domaine de *l'optoélectronique III-V* pour applications télécoms est nettement en retrait, pour des raisons évidentes de manque de soutien industriel suite au développement de surcapacités lors de la "bulle internet". A UCSB, c'est autour des futurs réseaux locaux que se concentrent les efforts, comme la réalisation de convertisseurs de longueurs d'ondes pour la commutation et le routage, selon des approches optoélectroniques très classiques, mais témoignant d'une impressionnante maîtrise en technologie d'intégration. On notera que les efforts sur les VCSEL à 1.55µm sont pratiquement abandonnés, à part les recherches de Stanford sur les composants de la filière GaAs à base de nitrures dilués. Au contraire, à UCSB, un gros effort a été fait pour pousser les performances à hautes fréquences des VCSEL émettant à 980 nm, avec notamment une forte efficacité différentielle (70%) et une faible dissipation en puissance (12.5GHz/mW). Mais compte tenu de la longueur d'onde, ce sont les applications aux interconnexions optiques qui sont visées ici.

3. Par ailleurs, les recherches menées témoignent d'un effort pour exploiter dans le domaine TIC les opportunités classiquement répertoriées des *nanostructures photoniques*: forte concentration du champ électromagnétique à l'échelle sub-longueur d'onde, notamment par les cavités à fort facteur de Purcell (fort  $Q/V$ ), lumière lente, métamatériaux à indice de réfraction négatif, dispositifs intégrés pour l'information quantique. C'est le cas notamment à Stanford, avec une forte activité sur les cristaux photoniques, que ce soit pour des commutateurs tout-optiques rapides à très faible énergie de commande, des sources de photons uniques pour l'information quantique, ou des circuits à retard optique préservant la cohérence du signal. C'est le cas également de Caltech, où les nanostructures plasmoniques sont étudiées pour des commutateurs optiques à très faible énergie, ou pour une communication très locale de signaux rapides.

4. Enfin, le domaine de *l'information quantique* n'était pas en reste, loin de là. L'évolution du domaine va dans le sens la démonstration sur des systèmes complets. Ceci était particulièrement net dans l'exposé de Yamamoto à Stanford sur la distribution de clé quantique à longue distance, comme il a été largement discuté dans la première partie de ce document. Par ailleurs, on note un souci de développer des produits commerciaux exploitant les propriétés des paires de photons intriqués, comme c'est le cas de Hewlett-Packard, a réalisé un générateur quantique de nombres aléatoires capable de résister aux tentatives de contrôle de la part d'un espion.

Pour faire un bilan et une comparaison avec ce qui se fait en France ou en Europe, faisons une première remarque: on trouve encore aux Etats-Unis des entreprises industrielles (comme ici Hewlett-Packard) qui croient suffisamment au rôle moteur de l'innovation technologique pour consacrer un effort significatif de recherche à des thèmes, certes porteurs, mais néanmoins très exploratoires. Cette différence d'approche ne date pas d'hier, mais dans les années récentes, ce type de recherche aux Etats-Unis avait beaucoup diminué, sans doute par nécessité de réduire les coûts, ou de recentrer les activités. Ceci constitue un signal intéressant sur les perspectives industrielles de la photonique, au moins vu du côté américain.

Par ailleurs, dans les domaines 3 et 4 ci-dessus, qui sont les plus « amont », les thèmes de recherche – et leur niveau – sont assez comparables dans leurs grandes lignes. Par contre, dans les domaines 1 et 2 (photonique sur silicium et optoélectronique III-V), plus proches des applications industrielles, on note un écart plus important. Des laboratoires universitaires comme Stanford, Caltech et UCSB consacrent d'importants efforts à des recherches technologiques susceptibles de transfert vers l'industrie. Cette situation ne connaît pas d'équivalent en France, ce qui est lié aux différences bien connues de structure de financement de la recherche, et aussi à la moindre pression industrielle sur ces sujets de ce côté-ci de l'Atlantique. Ces recherches demandent d'ailleurs une maîtrise de filières technologiques qui en France ne sont présentes que dans les laboratoires industriels, au moins dans le domaine de la photonique qui nous concerne ici.

## IV - CONCLUSION

Cette mission s'est avérée particulièrement riche en enseignements.

Au niveau purement scientifique, les recherches californiennes en nanophotonique sont du plus haut niveau mondial, mais comparables avec celles qui ont lieu en France, même si une certaine avance sur des technologies très appliquées comme l'intégration sur silicium a été observée. La plupart des résultats présentés étant déjà publiés par ailleurs, les visites étaient davantage l'occasion de préciser certains points, poser des questions complémentaires, rencontrer directement les chercheurs impliqués et établir des contacts, si cela n'avait pas déjà été fait. Globalement, on observe que tous les chercheurs rencontrés ne font pas uniquement de la nanophotonique, mais aux Etats Unis comme ailleurs, le mot « nano » est porteur, et tout le monde l'a bien compris. Dans beaucoup de cas, un même professeur et son équipe lance des axes « nano » en même temps qu'il poursuit des thèmes plus classiques. Si on devait retenir un seul type de structure, c'est assurément celui des cristaux photoniques qui revient le plus souvent dans les exposés. On peut mentionner aussi un glissement vers le domaine spectral du visible, en partie associé à l'émergence de la biophotonique.

Au niveau plus politique de l'organisation de la recherche et des moyens associés, on note plusieurs caractéristiques américaines qu'il est intéressant de rapporter dans le contexte actuel français. En premier lieu, on est surpris par la forte mise en commun des outils de recherche dans le cadre de centrales qui fonctionnent en « user facilities ». C'est le cas des centres CNSI, que nous avons visités à Los Angeles et Santa Barbara, du SNF à Stanford, ou de la Molecular Foundry à Berkeley. Dans tous les cas, des moyens importants de fabrication en salle blanche sont mis en commun, les surfaces sont de l'ordre de 1000m<sup>2</sup>, l'équipement de lithographie inclut évidemment un bon masqueur électronique et va souvent jusqu'au stepper. Ces centrales fonctionnent en permanence, sont "user operated" avec la plupart du temps une facturation au temps d'utilisation. Elles sont marquées par une très forte ouverture, à la fois vers les autres universités américaines ou étrangères, mais aussi vers les industriels. Le cas de la Molecular Foundry est remarquable car, à l'issue d'un simple appel à projets, elle garantit un accès gratuit aux installations et l'expertise de chercheurs permanents qui consacrent la moitié de leur temps à aider les chercheurs invités. Plusieurs de ces centres très récents ne sont pas encore totalement équipés, mais il apparaît d'ores et déjà que les moyens mis en œuvre, financiers et humains, sont conséquents et témoignent d'une véritable confiance dans l'avenir des filières concernées. Les atouts technologiques et l'autonomie que cela procure aux équipes de recherches californiennes semblent ne pas trouver d'équivalent pour l'instant en France, surtout sur des sujets appliqués, comme par exemple la photonique sur silicium pour les télécommunications optiques.

Le troisième point concerne les grands projets en cours, souvent financés par des agences nationales (ils sont un peu l'équivalent des projets intégrés européens, ou de ceux de l'AII). Ces grands projets sont l'occasion pour les laboratoires universitaires de lier des relations étroites avec l'industrie, ce que l'on retrouve au niveau des projets ou de la mobilité des personnes, mais aussi dans le financement d'opérations structurantes comme le CNSI.

Le quatrième point enfin est relatif aux budgets. Il est évidemment difficile de connaître les budgets de chaque équipe. Il faut aussi moyenner dans le temps pour tenir compte des variations contractuelles qui peuvent être fortes. En définitive, c'est en visitant les laboratoires que l'on peut arriver à estimer la richesse des équipes. Pour les laboratoires que nous avons visités, il semble que cette richesse soit supérieure à celle des laboratoires français les mieux lotis d'un facteur entre 1 et 2.

Un dernier point qui mérite d'être mentionné pour la réaction unanime qu'il a suscité auprès des membres de la délégation, concerne l'entreprise Hewlett Packard. Son groupe de recherche QSR est apparu étonnamment innovant, avec un effort de recherche significatif sur des thèmes très

exploratoires. Un tel niveau d'investissement dans des recherches aussi amont rappelle un peu les laboratoires Bell ou IBM d'une autre époque, et traduit une véritable foi dans l'avenir des technologies explorées. Alors que les locaux visités paraissaient tous étrangement vides, et que le contexte global est à la réduction des effectifs (cf. la fermeture récente de l'unité grenobloise), le fait que le QSR ait vu ses effectifs multipliés par 10 en 10 ans, est significatif.

En conclusion, on retrouve finalement en Californie un certain nombre d'éléments communs avec ce que l'on connaît en France (centrales communes, grands projets). La différence tient dans les moyens, supérieurs, mais surtout dans le dynamisme et l'ouverture.

La mission a également été très riche en échanges. En effet, lors des ateliers et des visites de laboratoires, la délégation a pu créer ou renforcer des liens avec les chercheurs américains, et même ébaucher des collaborations. Ces échanges ont par ailleurs été favorisés par l'organisation d'une réception à la résidence à San Francisco accueillant une trentaine de personnalités locales, et d'un déjeuner à la résidence du Consul Général à Los Angeles.

## **V- REMERCIEMENTS**

### **Daniel Ochoa**

Cette mission a bénéficié des crédits de l'Ambassade de France aux Etats-Unis attribués à la Mission pour la Science et la Technologie au titre du programme 185. Je tiens avant tout à remercier Michel Israël, Conseiller pour la Science et la Technologie, sans qui la mission n'aurait pas eu lieu, et Frédéric Desagneaux, Consul Général de France à San Francisco, pour avoir reçu la délégation et nos invités dans sa résidence. Je remercie également Philippe Larrieu, Consul Général de France à Los Angeles, pour le déjeuner qu'il nous a organisé dans sa résidence. Je n'oublie pas mon équipe du Consulat, Raphaël Allègre, Alison Anderson et Raegen Salais, qui ont œuvré activement sur la logistique de la mission. L'enthousiasme et le dynamisme de la délégation, pendant les visites et pour la rédaction du rapport, ont été particulièrement appréciables, un grand merci à vous tous.

Then, special thanks to Mark Brongersma and Kristina Konjevich for helping us to organize the workshop at Stanford, and to Evelyn Hu and Holly Wo for organizing the workshop at UCSB. I would like to thank also Paul Rissman (SNF), Carolyn Bertozzi (Molecular Foundry), Cheri Hadley (Molecular Foundry), Ulrich Dahmen (NCEM), David Lundberg (CNSI Los Angeles), Jack Whaley (cleanroom UCSB), and Stanley Williams (HP), for organizing the visits to their laboratories/institutes. Finally thank you to all the participants in the workshops, William Moerner (Stanford), James Harris (Stanford), Jelena Vuckovic (Stanford), Olav Solgaard (Stanford), Yoshihisa Yamamoto (Stanford), Mark Brongersma (Stanford), Shanhui Fan (Stanford), Harry Atwater (Caltech), Axel Scherer (Caltech), Matt Sysak (UCSB), Larry Coldren (UCSB), Daniel Blumenthal (UCSB), Pierre Petroff (UCSB), Evelyn Hu (UCSB), Nathaniel Stern (UCSB), Stacia Keller (UCSB), Felix Mendoza (UCSB), Stanley Williams (HP), David Fattal (HP) and Wei Hu (HP), for presenting their research to us.

### **Jean-Yves Duboz**

Sur le principe même de cette mission, il faut souligner qu'une telle mission eût été très difficile voire impossible à organiser de manière individuelle. Visiter 7 laboratoires en 5 jours et y être bien reçu était un challenge à plusieurs titres. Tout d'abord sur le plan de la logistique, et il fallait toute la logistique de la mission scientifique du consulat pour y parvenir. Ensuite, pour mobiliser l'intérêt de nos hôtes, bénéficier d'exposés nombreux et au meilleur niveau, il est beaucoup plus efficace de se présenter en groupe d'une dizaine de personnes plutôt que seul. Enfin, la synergie, la complémentarité entre membres de notre groupe nous a permis de profiter des visites, des discussions de façon plus forte que si nous avions fait ces visites individuellement. Ce genre de mission est donc d'un intérêt énorme pour la communauté scientifique française. Il faut donc féliciter D. Ochoa et R. Allègre pour leur initiative et leur travail sérieux, efficace, et agréable.

### **Emmanuel Hadji**

Sans le concours de l'équipe du Consulat Général, nous n'aurions pu, même avec la meilleure volonté et/ou la plus grande insistance, faire ces visites. Donc encore une fois merci pour nous avoir donné cette belle opportunité.

### **Christian Seassal**

Cette visite, rythmée par des ateliers, des séminaires et des visites de « facilities », a permis de faire état des lieux des développements californiens en photonique en un temps très bref. La rencontre entre les chercheurs de terrain français et américains dans un tel cadre, et non dans le contexte d'une conférence, est particulièrement appréciable.

### **Jean-Louis Oudar**

Cette mission fut particulièrement intéressante à plus d'un titre. Le choix du thème central "nanophotonique" et des laboratoires californiens les plus en pointe dans ce domaine a permis à notre groupe de réaliser un programme de visites à la fois dense (grâce au relatif regroupement géographique) et diversifié (diversité des applications de la nanophotonique, diversité des préoccupations de nos interlocuteurs), tout en lui offrant une vue assez précise du développement des infrastructures de nanofabrication pour la recherche, ainsi qu'une comparaison de leurs modes de fonctionnement. Grâce à l'excellent travail de préparation et d'organisation des services du consulat, nous avons pu bénéficier d'exposés d'excellent niveau et de visites très instructives, et l'ensemble de la mission s'est déroulé dans une ambiance fort conviviale. Pour tout cela nous pouvons remercier particulièrement Daniel Ochoa et Raphaël Allègre.

### **Hervé Rigneault**

Cette mission s'est déroulée dans d'excellentes conditions. Il faut tout d'abord souligner l'organisation quasi parfaite réalisée par les services du consulat et orchestrée par Daniel Ochoa et son co-équipier Raphael Allègre.

### **Photos de groupe**



De gauche à droite : Françoise Lozes, Christian Seassal, Daniel Ochoa, Raphaël Allègre, David Lungerg, Hervé Rigneault, Jean-Yves Duboz, Jean-Yves Marzin, Vincent Berger, Jean-Louis Oudar, Emmanuel Hadji



De gauche à droite : Hervé Rigneault, Françoise Lozes, Vincent Berger, Raphaël Allègre, Emmanuel Hadji, Christian Seassal, Jean-Yves Duboz, Jean-Yves Marzin, Jean-Louis Oudar, Roland Hérino.