



**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

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

Domaine	Micro-nanoélectronique
Document	Rapport de mission
Titre	L'électronique du futur, au-delà du transistor CMOS
Auteur(s)	Daniel Ochoa (attaché scientifique à San Francisco) Simon Deleonibus (CEA/LETI Grenoble) Erik Dujardin (CEMES Toulouse) Christian Glattli (CEA Saclay et ENS Paris) Dominique Mailly (LPN Marcoussis) Denis Vion (CEA Saclay)
Date	10 mars 2008
Contact MST	Daniel Ochoa ; attache-stic.mst@consulfrance-sanfrancisco.org
Numéro	SMM08_014

Mots-clefs	Microélectronique, nanoélectronique, spintronique, électronique moléculaire, information quantique, physique mésoscopique, transistor CMOS, ITRS
Résumé	Depuis 40 ans, l'industrie de la microélectronique a prospéré en se basant sur la technologie de transistors CMOS en Silicium, et en connaissant une course effrénée à la miniaturisation, dite « loi de Moore ». Cette course, qui semblait inexorable, connaîtra pourtant un fort ralentissement dans la prochaine décennie, car elle se heurtera à des barrières physiques incontournables. Le transistor CMOS pourrait alors se voir remplacer en partie par de nouveaux concepts 'Beyond-CMOS', aux rangs desquels figurent : la spintronique, l'électronique moléculaire, la nanoélectronique quantique et l'information quantique. Du 3 au 7 décembre 2007, une délégation de cinq experts français s'est rendue aux États-Unis, à la fois sur la côte Est et dans la Silicon Valley, pour explorer les recherches portant sur ces concepts. Les multiples visites de laboratoires publics et privés, rencontres de chercheurs, et présentations scientifiques de qualité, ont permis de dresser un panorama assez complet des recherches les plus prometteuses aux États-Unis. Les groupes de recherche rencontrés font preuve d'un dynamisme évident, et de financements conséquents, provenant à la fois des agences fédérales comme de consortiums privés. Ce sont ces modes de financement et ce panorama des recherches que présente ce rapport.

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 ÉTATS-UNIS

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



L'ÉLECTRONIQUE DU FUTUR, AU-DELA DU TRANSISTOR CMOS

UN APERÇU DES RECHERCHES AUX ÉTATS-UNIS

Février 2008

Daniel Ochoa (attaché scientifique à San Francisco)
Simon Deleonibus (CEA/LETI Grenoble)
Erik Dujardin (CEMES Toulouse)
Christian Glattli (CEA Saclay et ENS Paris)
Dominique Mailly (LPN Marcoussis)
Denis Vion (CEA Saclay)

RESUME

Depuis 40 ans, l'industrie de la microélectronique a prospéré en se basant sur la technologie de transistors CMOS en Silicium, et en connaissant une course effrénée à la miniaturisation, dite « loi de Moore ». Cette course, qui semblait inexorable, connaîtra pourtant un fort ralentissement dans la prochaine décennie, car elle se heurtera à des barrières physiques incontournables. Le transistor CMOS pourrait alors se voir remplacer en partie par de nouveaux concepts 'Beyond-CMOS', aux rangs desquels figurent : la spintronique, l'électronique moléculaire, la nanoélectronique quantique et l'information quantique. Du 3 au 7 décembre 2007, une délégation de cinq experts français s'est rendue aux États-Unis, à la fois sur la côte Est et dans la Silicon Valley, pour explorer les recherches portant sur ces concepts. Les multiples visites de laboratoires publics et privés, rencontres de chercheurs, et présentations scientifiques de qualité, ont permis de dresser un panorama assez complet des recherches les plus prometteuses aux États-Unis. Les groupes de recherche rencontrés font preuve d'un dynamisme évident, et de financements conséquents, provenant à la fois des agences fédérales comme de consortiums privés. Ce sont ces modes de financement et ce panorama des recherches que présente ce rapport.

1.	INTRODUCTION	4
2.	FINANCEMENT DE LA RECHERCHE POST-CMOS.....	6
2.1.	LES FINANCEMENTS FEDERAUX	6
2.2.	LES INITIATIVES LOCALES : FINANCEMENTS REGIONAUX.....	7
2.3.	LE ROLE DES ASSOCIATIONS D'INDUSTRIELS	8
3.	LE CMOS ULTIME.....	10
3.1.	DEFIS DE LA MICROELECTRONIQUE DEPUIS LE DEBUT DES ANNEES 1990.....	10
3.2.	EVOLUTION DES PRODUITS PHARES TIRANT LE PROGRES TECHNOLOGIQUE	11
3.3.	SITUATION DE LA MICROELECTRONIQUE AMERICAINE VIS A VIS DE L'INTERNATIONAL	12
3.4.	RECHERCHES SUR LE CMOS ULTIME	12
4.	LA SPINTRONIQUE.....	14
4.1.	MEMOIRES MAGNETIQUES MRAM.....	14
4.2.	LES MEMOIRES NON VOLATILES CONCURRENTES DES MRAMS.....	15
4.3.	LE SYSTEME UNIVERSITAIRE DE NANOFABRICATION	17
5.	L'ELECTRONIQUE MOLECULAIRE	18
5.1.	COLUMBIA UNIVERSITY	19
5.2.	LABORATOIRES DE RECHERCHE IBM (YORKTOWN ET ALMADEN)	22
5.3.	LABORATOIRES HP (PALO ALTO).....	25
6.	NANOELECTRONIQUE QUANTIQUE ET PHYSIQUE MESOSCOPIQUE.....	27
6.1.	INTRODUCTION	27
6.2.	L'ACTIVITE AUX ETATS-UNIS.....	28
6.3.	CONCLUSION	32
7.	INFORMATION QUANTIQUE.....	33
7.1.	INTRODUCTION ELEMENTAIRE AU TRAITEMENT QUANTIQUE DE L'INFORMATION.....	33
7.2.	LES QUBITS DANS LE DIAMANT	36
7.3.	LES QUBITS DANS DES BOITES QUANTIQUES SEMI-CONDUCTRICES	39
7.4.	LES QUBITS SUPRACONDUCTEURS	41
7.5.	CONCLUSION SUR LES VISITES	45
8.	CONCLUSION	46
9.	ANNEXES	47
9.1.	PROGRAMME DES VISITES	47
9.2.	PHOTOGRAPHIE DE GROUPE	51
9.3.	BIOGRAPHIE DES PARTICIPANTS.....	51
9.4.	TABLES DES ILLUSTRATIONS.....	54

1. INTRODUCTION

Depuis une trentaine d'années, l'industrie de la microélectronique repose sur des technologies éprouvées, basées sur le Silicium et son oxyde, et au cœur desquelles se trouve le fameux transistor CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor). Cette industrie a connu un boom économique sans précédent à l'origine de la Silicon Valley, d'une industrie d'environ 250 milliards de dollars, et d'une révolution sociétale avec, entre autres, l'apparition d'Internet, des téléphones portables, et des systèmes embarqués. Cet essor est en grande partie dû à la miniaturisation constante des composants, qui permet de fabriquer des circuits toujours plus puissants à des coûts relativement constants. En 1965, Gordon Moore, co-fondateur d'Intel, postulait la loi qui allait le rendre célèbre, et qui porte son nom. Cette loi dit que la miniaturisation est exponentielle, le nombre de fonctions par puce étant multiplié approximativement par deux tous les deux ans¹. Actuellement, les motifs de base des circuits les plus avancés mesurent 45nm (le dernier processeur Penryn d'Intel), et ces dimensions devraient atteindre 16nm d'ici 2019, comme le prévoit la feuille de route de l'industrie microélectronique (ITRS).

Atteindre de telles dimensions industriellement relève déjà d'un véritable défi technologique et économique. L'instrumentation est, en effet, devenue de plus en plus complexe et coûteuse. Pour imprimer des motifs toujours plus fins sur les circuits, les appareils de photolithographie se sont complexifiés², au détriment d'un coût sans cesse croissant, avoisinant aujourd'hui les 50 millions de dollars. S'ajoutent à cela l'introduction de substrats SOI (Silicon on Insulator), et de matériaux toujours plus exotiques, comme le cuivre qui a commencé par remplacer l'aluminium dans les pistes d'interconnexions, les nouveaux oxydes de grille 'high-K' à base d'Hafnium qui remplacent l'oxyde de Silicium dans les derniers circuits de génération 45nm, et divers métaux qui remplacent le polysilicium dans les grilles de contact. Si la tendance se poursuit, les procédés de fabrication devraient bientôt utiliser plus d'une cinquantaine d'éléments chimiques. La complexité de ces procédés fait que le coût global d'une usine de fabrication est actuellement d'environ 3 milliards de dollars, que seuls les très grands groupes comme Intel ou AMD peuvent s'offrir. La poursuite de la miniaturisation selon la feuille de route de l'ITRS n'est déjà plus l'apanage que d'un nombre restreint d'industriels disposant de chiffres d'affaire exceptionnels.

Pourtant, ces difficultés économiques ne sont pas celles qui menacent le plus la loi de Moore pour les années à venir. La physique prédit en effet un arrêt pur et simple de la loi d'ici une dizaine d'années. En effet, au-delà du nœud technologique 16nm, les dimensions de base des transistors approcheront dangereusement des dimensions atomiques, pour lesquelles ils ne pourront plus fonctionner normalement. Les oxydes de grille (même avec les matériaux high-K) seront si fins que les fuites par effet tunnel seront rédhibitoires, à quoi s'ajouteront des problèmes quasiment insolubles de dopage³. Ces problèmes se font déjà sentir depuis un certain temps, et se manifestent par une consommation électrique et un chauffage excessifs des circuits, ce qui a valu récemment à Intel le retrait du marché de son processeur Prescott. La parade est alors à la diminution des fréquences d'horloge et à la multiplication du nombre de cœurs. On envisage également d'avoir recours à des architectures asynchrones qui permettraient des économies importantes de puissance consommée. Pourtant, ces alternatives ne changent rien à la nature intrinsèque du problème : la course à la miniaturisation et la loi de Moore sont vouées à s'arrêter dans peu de temps.

¹ *Il s'est avéré que la puissance des ordinateurs à coût constant, ainsi que la capacité de mémoire des disques durs et des mémoires DRAM suivent la même loi. En revanche la puissance des ordinateurs augmente d'un facteur 2 tous les 18 mois environ.*

² *Diminution de la longueur d'onde d'exposition, de 248nm à 193nm, avec peut être pour bientôt des techniques complexes d'immersion, voire de l'extrême UV.*

³ *Peut-on encore parler de dopage avec un seul atome donneur ou accepteur ?*

Le modèle économique de l'industrie microélectronique qui repose en grande partie sur cette course à la miniaturisation, a si bien fonctionné pendant 30 ans que la communauté scientifique réfléchit activement aux différents scénarios qui permettront de maintenir le type de progrès illustré par la loi de Moore:

1) via l'offre d'un « scaling équivalent » qui permettra de garder l'introduction de nouvelles fonctionnalités sans passer par la miniaturisation ou l'intégration de dispositifs du type « Beyond CMOS ». Les outils à l'étude sont nombreux: intégration Tri dimensionnelles (3D) de différentes sortes, ajouts de nouveaux matériaux permettant d'introduire de nouvelles fonctionnalités dans le domaine analogique, capteurs, actionneurs, etc...

2) à la poursuite au-delà du CMOS ('post-CMOS' ou 'beyond-CMOS'), grâce à l'introduction de nouveaux concepts n'utilisant pas l'architecture classique du transistor CMOS et les techniques de fabrication de la microélectronique silicium. Ces concepts font l'objet de recherches très actives aux États-Unis comme en France, la feuille de route de l'ITRS leur consacre tout un chapitre sous le nom de 'Emerging Research Devices'. Les principales pistes abordées sont les suivantes :

- les transistors 1D, utilisant des nanotubes de carbone, ou des nano-fils
- les transistors à électron unique (SET, 'single electron transistor') utilisant des boîtes quantiques semi ou supra-conductrices
- l'électronique moléculaire
- la spintronique, ou l'utilisation du spin des électrons au lieu de leur charge
- la logique ferromagnétique utilisant le déplacement de domaines magnétiques au lieu de charges
- l'informatique quantique utilisant des qubits quantiques au lieu de bits classiques, amplifiant de façon exponentielle le parallélisme de certains calculs.

Dans les deux cas de figure, ces concepts seront ajoutés au CMOS, et le remplaceront partiellement, là où ce dernier ne pourra plus assurer les fonctionnalités requises. Les enjeux technologiques et commerciaux de ces recherches sont tels que la Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France a décidé d'organiser une mission exploratoire sur le sujet, afin de faire le point sur l'état de l'art des recherches aux États-Unis. Cinq experts français participaient à la mission, représentant chacun une des disciplines les plus prometteuses concernant les recherches 'post CMOS' : Simon Deleonibus du CEA LETI à Grenoble pour les aspects CMOS Ultime, Erik Dujardin du CEMES à Toulouse pour l'électronique moléculaire, Christian Glatthli du CEA Saclay ainsi que de l'ENS Paris pour la physique mésoscopique et l'électronique quantique, Dominique Mailly du LPN Marcoussis pour la nanoélectronique et les aspects de nanofabrication, et Denis Vion du CEA Saclay pour l'informatique quantique. Durant toute la mission, les experts étaient accompagnés par les organisateurs, représentants du service scientifique au Consulat Général de France à San Francisco : Daniel Ochoa, attaché scientifique et Jean-Baptiste Kempf, volontaire international.

La mission s'est déroulée du lundi 3 au vendredi 7 décembre, entre New York, New Haven, Boston et la Silicon Valley. Avec un total de 28 présentations, elle était d'un contenu scientifique très dense, et a permis à la délégation de rencontrer une cinquantaine de personnes, dont certains des chercheurs les plus célèbres dans leur domaine, de visiter plusieurs laboratoires universitaires et privés, ainsi que des salles blanches. Le programme de la semaine se trouve en annexe, avec le nom des personnes rencontrées. Un programme d'une telle densité nous a permis de faire un point détaillé des recherches ayant lieu aux États-Unis sur le post-CMOS. Ce rapport n'a cependant pas vocation à être exhaustif, pour des raisons évidentes de taille du pays et de limite dans la durée de la mission. Il est organisé par thématiques, chacune étant traitée dans un chapitre par le missionnaire qui en est le spécialiste : Introduction et Financement de la recherche Post-CMOS (Daniel Ochoa), Le CMOS Ultime (Simon Déléonibus), la Spintronique (Dominique Mailly), l'Electronique Moléculaire (Erik

Dujardin et Christian Glattli), Nanoélectronique Quantique et Physique Mésoscopique (Christian Glattli), Information Quantique (Denis Vion), Conclusion (Daniel Ochoa).

2. FINANCEMENT DE LA RECHERCHE POST-CMOS

D'ici une dizaine d'années, le modèle économique qui a prévalu jusqu'à présent dans l'industrie du semiconducteur devra changer, pour inclure les technologies 'post-CMOS'. Ce changement sera vital pour les industriels, et pourtant ces derniers semblent actuellement plus préoccupés par la poursuite du modèle traditionnel, essentiellement pour des raisons économiques. Quelques industriels, comme IBM et HP, ont encore des laboratoires propres impliqués dans une recherche de qualité en physique fondamentale, très en amont des applications électroniques, mais ils représentent une exception. La plupart des industriels préfèrent, comme Intel, financer des recherches académiques en attendant qu'une technologie émerge, et en se tenant prêts à pouvoir la développer rapidement. Ces industriels se sont organisés autour de plusieurs programmes de financement comme le FCRP (Focus Center Research Program) ou le NRI, disposant d'une structuration complexe mais efficace en termes de thématiques, d'objectifs et de pôles géographiques. Les recherches 'post-CMOS' se font donc principalement dans les laboratoires universitaires et nationaux. Ces derniers disposent de financements fédéraux importants, au travers notamment de la NNI, ainsi que de certains financements régionaux. De nombreuses salles blanches ont vu le jour récemment, faisant partie entre autres du NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network) ou des 5 nouveaux centres NSRC (Nanoscale Science Research Centers) du DOE. Grâce à ces instruments de haut niveau, les laboratoires américains peuvent prétendre relever le défi du post-CMOS.

2.1. Les financements fédéraux

Une conséquence directe de la poursuite de la loi de Moore, est qu'une majorité des recherches sur l'électronique post-CMOS se placent sur le terrain des nanotechnologies, qu'il s'agisse de transistors ultimes utilisant l'approche 'top-down', ou d'agrégats de molécules auto-assemblées utilisant l'approche 'bottom-up'. L'administration du président Clinton ayant reconnu en 2001 l'importance des recherches sur les nanotechnologies, pas seulement pour l'électronique du futur, mais aussi dans les domaines de la santé, de l'énergie, et de la défense, a décidé de les coordonner en créant le NNI (National Nanotechnology Initiative).

Les financements du NNI ont été presque multipliés par trois depuis sa création, passant de 464 millions de dollars en 2001 à près de 1.3 milliard de dollars en 2007, et le budget proposé pour 2008 est de 1.45 milliard de dollars, ceci dans un contexte de diminution générale des crédits fédéraux de recherche. Ce budget est distribué aux principales agences fédérales ayant un lien avec les nanotechnologies. Il s'agit principalement de la NSF (28% du budget), le DOD (25%) et le DOE (18%). Les principaux bénéficiaires de la croissance du budget 2007 sont liés à l'American Competitiveness Initiative (ACI) : la NSF, le DOE et le NIST (National Institute of Standards and Technology).

Une partie importante du budget attribué par la NNI aux différentes agences sert à financer des projets de recherche par le biais de contrats de financement ('grants'). Schématiquement, les projets les plus fondamentaux sont financés par des contrats de la NSF. Les montants ainsi attribués sont généralement moins importants que ceux qu'attribuent la DARPA (la branche recherche du DOD) et le DOE aux projets plus appliqués. Les programmes de la DARPA en rapport de près ou de loin avec l'électronique post-CMOS sont au nombre de six : FCRP, CAD-QT, COSMOS, ECHIPPS, EPIQ et ESE.

La NNI chapeaute également un grand nombre d'investissements matériels, liés à la création et au fonctionnement de centres de recherche d'excellence. Ces centres sont multidisciplinaires, ouverts à la fois aux équipes académiques et privées, et insistent sur le transfert de technologie, des

laboratoires aux applications. La NSF gère ainsi 16 centres appelés NSEC (Nanoscale Science and Engineering Centers)⁴.

En parallèle, le DOE a récemment mis en place 5 centres appelés NSRC (Nanoscale Science Research Centers) pour lesquels son Bureau des Sciences de Base pour l'Énergie (BES) a dépensé 400M\$. Ils se trouvent dans les grands laboratoires nationaux du DOE à Berkeley (Molecular Foundry), Brookhaven (New York), Sandia et Los Alamos (Nouveau Mexique), Oak Ridge (Tennessee) et Argonne (Illinois), ce qui leur donne un environnement de travail très favorable, avec la proximité de grands instruments (synchrotrons, microscopie électronique...) et de centres de calcul. Ces centres fonctionnent comme des 'hôtels à projets' permettant à des équipes extérieures de disposer des locaux et des équipements gratuitement, sous simple condition de publication et sur sélection par un appel à projets annuel.

Enfin, en lien avec la NSF, la NNI a mis en place un réseau d'infrastructures appelé NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network), comportant 13 centres⁵, et dont l'objectif est d'apporter à ses utilisateurs les outils nécessaires à la modélisation, fabrication et caractérisation des dispositifs nanométriques.

2.2. Les initiatives locales : financements régionaux

Aux financements fédéraux s'ajoutent des financements régionaux, sur initiative du gouvernement des différents Etats.

En Californie par exemple, le gouverneur Davis avait annoncé fin novembre 2000, la création de 4 'California Institutes for Science and Innovation' (CalISI)⁶, avec une enveloppe de 400M\$ pour 4 ans, dans une démarche ambitieuse pour soutenir la recherche dans des domaines-clés pour la croissance économique de l'Etat. Parmi ces instituts, le CNSI (California NanoSystem Institute) à Los Angeles et Santa Barbara vient d'être achevé, et aura coûté une centaine de millions de dollars à l'Etat Californien. Il devrait bientôt constituer un centre de recherche majeur en Californie du Sud, dans les thématiques des nano-sciences et nano-technologies, et plus particulièrement de l'électronique post-CMOS. Il sera notamment très fortement associé au pôle de recherche FENA (voir paragraphe suivant).

De la même manière, l'Etat de New-York a investi dans les nanotechnologies, en partie afin de maintenir l'effort de recherche d'IBM dans la région. Le CNSE (College of Nanoscale Science and Engineering) a ainsi vu le jour à l'Université d'Albany, pour un investissement total de 4.2 milliards de dollars, dont 2 milliards de l'Etat et 500 millions d'IBM. Il est considéré aujourd'hui comme le centre de recherche, éducation, développement sur les nanotechnologies le plus important au monde, avec 1700 employés, 8000m² de salle blanche en 300nm et des équipements de lithographie EUV. Ce centre d'excellence a attiré plus de 100 industriels (IBM, ASML, Infineon, AMD...) avec plus de 7 milliards de dollars d'investissements.

⁴ *University of Colorado à Boulder, Cornell University à Ithaca (NY), University of Massachusetts à Amherst, Harvard University, Rice University à Houston, Northwestern University à Chicago, Columbia University à New York, UCLA, University of Illinois à Urbana Champaign, University of Wisconsin à Madison, Stanford University, Ohio State University, UC Berkeley, University of Pennsylvania, Northeastern University près de Boston et Rensselaer Polytechnic Institute à Troy (NY).*

⁵ *Cornell University, Stanford University, University of Michigan, Georgia Institute of Technology, University of Washington, Pennsylvania State University, University of California Santa Barbara, University of Minnesota, University of New Mexico, University of Texas à Austin, Harvard University, Howard University, North Carolina State University.*

⁶ *Il s'agit du CNSI (California NanoSystem Institute) entre UCLA et UCSB sur les nanosciences, le QB3 (California Institute for Quantitative Biological Research) entre UC San Francisco, UC Berkeley, et UC Santa Cruz, le Cal-(IT)² (California Institute for Telecommunications and Information Technology) entre UC San Diego et UC Irvine, et le CITRIS (Center for Information Technology Research in the Interest of Society) entre UC Berkeley, UC Davis, UC Merced, et UC Santa Cruz.*

2.3. Le rôle des associations d'industriels

Dans un esprit de mutualisation des outils de recherche, et face à la concurrence internationale, l'industrie du semiconducteur américaine s'appuie sur plusieurs associations, allouant chacune un budget aux recherches et développement sur des nœuds technologiques distincts. Du plus aval au plus amont, on trouve l'association internationale SEMATECH travaillant sur les nœuds 45-32nm, le GRC (Global Research Corporation) sur les nœuds 32-22nm, le FCRP (Focus Center Research Program) sur les nœuds 22-16nm et le NRI (Nanoelectronics Research Initiative) sur les nœuds 11-6nm. Les associations GRC, FCRP et NRI sont chapeautées par l'association internationale SRC (Semiconductor Research Corporation).

Très proches des développements industriels à court terme, les travaux financés par SEMATECH (150M\$) sortent du champ d'études qui nous intéressent. L'association internationale GRC finance, pour 30M\$, 300 projets de recherche universitaires visant à la poursuite de la loi de Moore, qui n'entrent pas non plus directement dans la catégorie du post-CMOS.

Plus amont, le FCRP a été établi afin de poursuivre la loi de Moore jusque dans ses ultimes retranchements, en brisant les différents blocages ('red brick walls') de l'ITRS. Il agit donc à la frontière des recherches post-CMOS qui nous intéressent.

Il s'agit d'une initiative purement américaine, gouvernée par l'association MARCO (Microelectronics Advanced Research Corporation), et financée à la fois par l'industrie via le SIA (Semiconductor Industry Association), et le gouvernement via la DARPA. Le FCRP agit comme extension naturelle du fort lien historique qui existe aux États-Unis entre l'industrie du semiconducteur, le gouvernement fédéral, et la recherche académique. Il finance 38 universités au travers de 5 pôles de recherche disposant chacun d'un budget annuel d'environ 10M\$, piloté par une université leader, et se focalisant sur des recherches plus ou moins amont (du système à la physique, en passant par le circuit) :

- Le GSRC (Gigascale Systems Research Center, 14 universités, pilote : UC Berkeley) s'intéresse aux problèmes de conception liés à la complexité croissante des systèmes (passage aux architectures parallèles, codes correcteurs d'erreurs).
- Le C2S2 (Circuits, Systems, Software Center, 10 universités, pilote : Carnegie Mellon) s'intéresse en priorité aux circuits (convertisseurs analogue-digital, hétérogènes, post-cmos), de leur conception à leur intégration dans des systèmes.
- L'IFC (Interconnect Focus Center, 6 universités, pilote : Georgia Tech) s'intéresse aux interconnexions (opto-électronique, nano-fils, nanotubes de carbone) qui avec la miniaturisation des circuits, posent des problèmes majeurs de temps de réponse et de puissance.
- Le MSD (Materials, Structures & Devices Center, 10 universités, pilote : MIT) pousse la miniaturisation du CMOS dans ses ultimes retranchements, en explorant les pistes les plus prometteuses pour la microélectronique des 20-30 prochaines années (sub-10nm Si-FET, électronique organique, CNT).
- Le FENA (Functional Engineering Nano-Architectonic, 12 universités, pilote : UCLA, en lien direct avec le CNSI), créée en 2004, il est le plus récent des programmes FCRP. Il est



Figure 1 Initiatives pilotées par l'industrie américaine concernant le CMOS Ultime et le Post-CMOS. Crédits : P. Gargini, INTEL corp.

également le plus en lien direct avec les recherches post-CMOS, la priorité étant donnée à l'électronique moléculaire, la synthèse de matériaux nano-structurés, la simulation de composants nanométriques, ainsi qu'à l'étude de nouvelles architectures de calcul pour les générations post-CMOS.

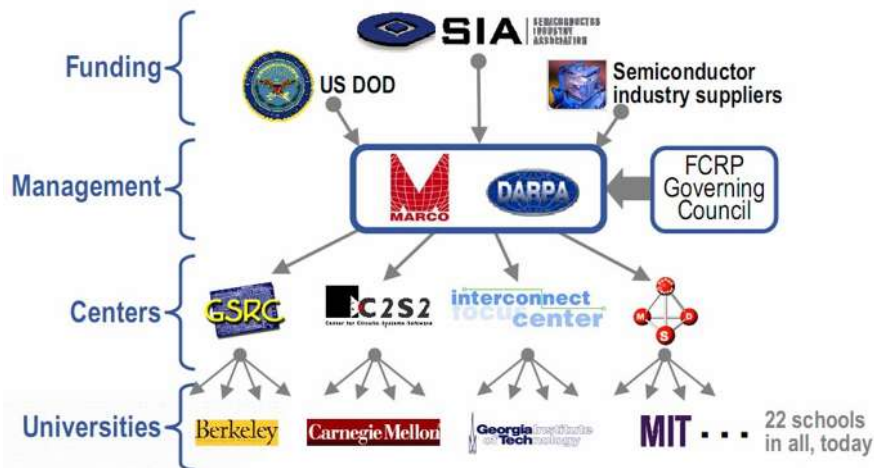


Figure 2 Le FCRP (Focus Center Research Program) est une association à l'interface entre l'industrie, le gouvernement fédéral et les universités, finançant des projets de recherche universitaires sur les recherches de CMOS très avancé se situant sur les nœuds 22-16nm. Crédits : Rob Rutenbar, Carnegie Mellon University, FCRP.

Encore plus amont que le FCRP, et en lien direct avec le post-CMOS, se trouve le NRI (Nanoelectronics Research Initiative). L'objectif affiché du NRI est d'aboutir d'ici 2020 à un premier concept éprouvé et industrialisable de composant logique capable de remplacer le transistor CMOS. Il dispose d'un budget de 50M\$, provenant à la fois de la NSF, via le NNI, et des 6 industriels AMD, Freescale, IBM, Intel, Micron et Texas Instruments, avec lequel il finance 23 universités, dont 9 avec des fonds de la NSF au travers des NSEC (Nanoscale Science & Engineering Center). Le NRI est organisé en 3 pôles géographiques :

- le WIN (Western Institute of Nanoelectronics) en Californie, autours des universités UCLA (pilote), UCSB, UC Berkeley et Stanford. Ses recherches sont centrées sur la nano-spintronique et la nano-plasmonique, des matériaux aux composants, et à leur intégration. En plus des fonds provenant du NRI, le WIN dispose d'un financement complémentaire d'INTEL et de l'IUCRP (UC Discovery Grant).
- INDEX (Institute for Nanoelectronics Discovery and eXploration) sur la côte Est, autours du centre CNSE de l'université d'Albany (pilote), et des universités de Yale, le MIT, Harvard, Georgia Tech, Renselaer Polytechnic Institute et Purdue. Ses recherches portent sur le développement de nano-systèmes, de nouvelles techniques de fabrication à l'échelle atomique, de composants quantiques magnétiques et moléculaires. INDEX reçoit un complément financier direct d'IBM et de l'Etat de New York.
- SWAN (South West Academy for Nanoelectronics) au Texas, autours de UT Dallas (pilote), UT Austin, Rice, Texas A&M, Notre Dame, Arizona State et l'université du Maryland. Les recherches portent sur une variété de nouveaux composants utilisant les valves de spin, les nano-fils, les interférences électroniques, les nano-aimants, ainsi que sur la modélisation de composants utilisant des variables d'état alternatives. SWAN reçoit un complément financier de Texas Instrument, et du Texas Emerging Technology Fund.

En complément de ces trois pôles géographiques, le NRI s'articule autours du NCN (Network for Computational Nanotechnology) dont le cœur se trouve à l'université de Purdue.

3. LE CMOS ULTIME

3.1. Défis de la microélectronique depuis le début des années 1990

Depuis le début des années 90, la microélectronique fait face à des défis technologiques sans précédents. En effet, afin de développer les nouveaux produits dépassant typiquement de 1 à 10 millions de transistors, il a fallu introduire de nouvelles technologies telles que le plug et le polissage mécano-chimique (CMP), assurant la voie vers l'utilisation de plus de 3 niveaux d'interconnexions (voir la figure ci-dessous).

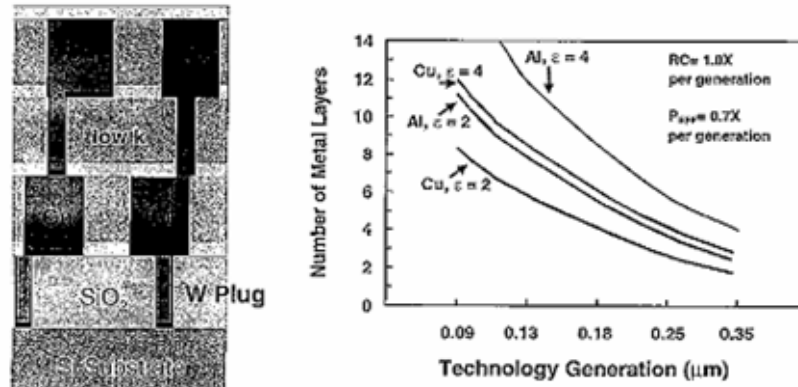


Figure 3 Nombre de niveaux de métaux d'interconnexions nécessaires pour maintenir le temps de transit par porte constant en fonction du nœud technologique. On a tenu compte d'une mise à l'échelle des dimensions critiques (ligne et espace) de 0,7 par génération. Simulations pour le métal aluminium et cuivre. (Intel IEDM 1995).

Les schémas traditionnels d'interconnexions ont subi une remise en cause et un enrichissement dans la première moitié des années 90, grâce notamment à l'introduction des techniques de plugs, la planarisation par CMP et la métallisation Cuivre.

Le 2^{ème} défi majeur est apparu à cause de la mise à l'échelle des transistors MOS qui nécessite, en particulier, la réduction de l'épaisseur de l'isolant de grille. En dessous du nœud 130nm, l'optimisation des dispositifs à Haute Performance nécessite une épaisseur d'isolant de grille dans la gamme 2,5 à 3nm ce qui augmente la probabilité de passage tunnel des porteurs du canal à travers l'isolant (voir la figure ci-dessous).

D'actives recherches ont été engagées dès le début des années 1990 sur les matériaux à forte constante diélectrique, permettant d'utiliser un isolant de grille d'épaisseur plus importante qu'avec du SiO₂ pour obtenir une capacité de couplage suffisante avec le canal d'inversion, tout en limitant le courant tunnel.

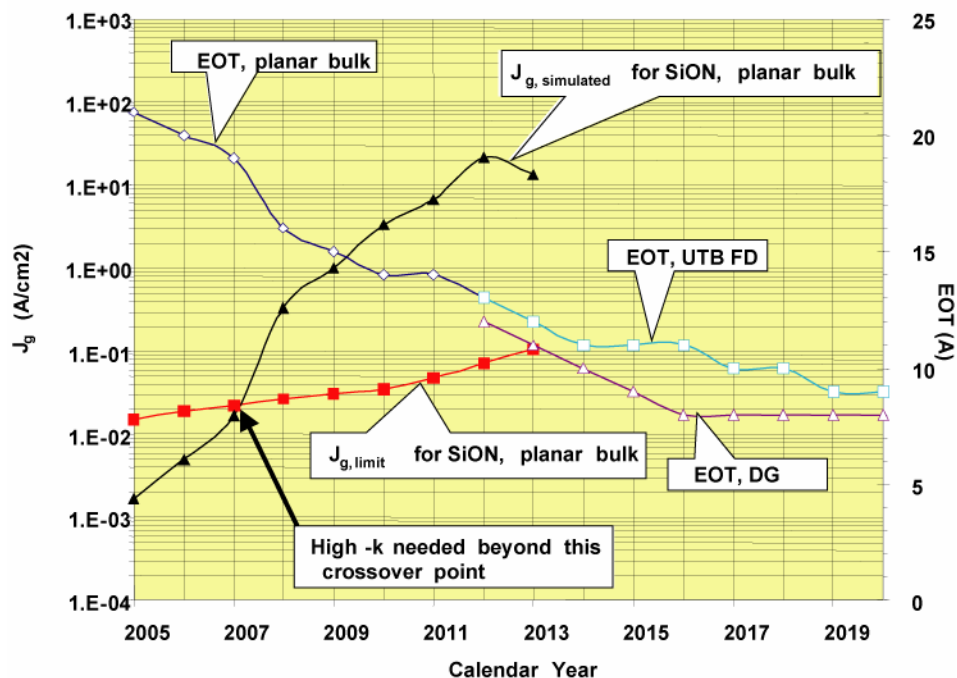


Figure 4 Evolution d'après ITRS 2005 de l'épaisseur équivalente d'isolant de grille (EOT) du courant de fuite (J_g) pour les différentes technologies planar bulk, film mince (UTB FD) et Double grille (DG). La fuite limite admissible (consommation statique) pour l'isolant de grille classique SiON est donnée en rouge : au point de croisement de la limite admissible un isolant High K est nécessaire. En effet, des annonces ont été faites en 2007 pour la mise en production de tels matériaux (Oxyde d'Hafnium HfO₂) (ITRS 2005)

3.2. Evolution des produits phares tirant le progrès technologique.

Traditionnellement, et ce jusqu'en 1991, les japonais dominaient le marché grâce aux DRAMs, ce qui a énormément fait progresser les 'clean concepts' et le taux de défauts (surtout la partie liée aux défauts extrinsèques). Les développements sur les interconnexions ont bénéficié, en tout premier lieu, aux fabricants de circuits logiques rapides (et tout particulièrement microprocesseurs) à cause du poids des interconnexions sur la vitesse des circuits. Les fabricants européens comme ST Microelectronics ont bénéficié du développement du marché des télécommunications (téléphone portable) ce qui a pu les positionner dans le top 5 (3^{ème} position en 2004). Les atouts en conception de sociétés comme Intel et IBM ont permis de rétablir un équilibre avec la position dominante japonaise sur le marché des DRAMs. Deux sortes de produits phares tiraient alors la technologie, les DRAM et les microprocesseurs.

Par la suite, le nomadisme aidant, les mémoires NVM (Non Volatile Memory) à base de cellules NAND ont pu trouver leur développement grâce notamment au développement de cartes Flash et solutions du type USB. La position traditionnelle des fabricants comme Intel sur le marché des microprocesseurs a constitué un formidable atout pour cette société qui, concluant un accord avec Microsoft, a pu prendre un envol et une avance considérable sur la concurrence dans le contexte du développement d'Internet. Des sociétés comme AMD ont pu résister grâce à leur capacité d'innovation (premiers à introduire des microprocesseurs sur substrat SOI permettant de diminuer la consommation de 40% à vitesse donnée) et surtout l'existence de la loi anti trust qui empêche encore aujourd'hui Intel de posséder 100% du marché.

3.3. Situation de la microélectronique américaine vis à vis de l'international.

La situation de l'industrie américaine sur le marché est assez particulière. En effet, les 1^{er} et 4^{ème} producteurs mondiaux sont américains et ont une typologie très différente. Au dernier classement 2007, Intel (1^{er}), société à forte implication technologique, possède 12,2% du marché. Texas Instruments (4^{ème} avec 4,8% du marché), est en voie de devenir totalement fabless et a été doublé par Toshiba en croissance de +27,8% ! Le suivant, AMD (8^{ème}), possède 2,9% du marché. Micron, fabricant de DRAM et NVM est 13^{ème} (2,0% du marché) et a perdu d'importantes parts de marché face à Qimonda et Hynix. IBM, qui a raté le virage des NVM NAND tente une Alliance avec STMicroelectronics.

Le positionnement vis-à-vis du développement CMOS sub 32nm est lié à la capacité d'investissement de ces sociétés. Elles ne peuvent rester dans la course à l'intégration de la technologie CMOS que si leur chiffre d'affaire excède les 10 G\$. C'est ce qui explique le positionnement de chacun des acteurs américains.

IBM, par ailleurs, détient une position particulière grâce notamment à un gros portefeuille de brevets. Dans les années 90, IBM a innové dans le modèle de coopération sur les DRAM, avec Toshiba et Siemens (Infineon) et a renforcé son alliance actuelle sur le CMOS à East Fishkill avec 8 partenaires. L'objectif est de partager les coûts des filières futures non plus à 2 ou 3 comme c'était le cas sur les DRAM mais à 7 ou 8 ! En effet, le coût de développement d'une filière 32 nm Haute Performance, par exemple, est de 1G\$. Il est certain qu'il vaut mieux le partager à plusieurs. Par ailleurs, si l'on veut accélérer le transfert en production de masse, il vaut mieux avoir un « fondeur » avec soi sur la plateforme. Aujourd'hui, UMC fait partie de l'Alliance IBM.

Cypress, Altera, Maxim, sont des sociétés à faible capacité, voire sans capacité technologique. Elles ont misé, soit sur les niches utilisant des technologies à forte valeur ajoutée, soit sur des conceptions personnalisées (FPGA, ASICS,...) dans des sociétés comme Xilinx, Altera, Lattice, Actel, ATMEL, Cypress, QuickLogic, Nallatech. Les validations de leurs designs sont assurées grâce aux grands fondeurs (TSMC, UMC, ...)

3.4. Recherches sur le CMOS Uptime.

Via un pilotage par le SRC, l'Industrie Américaine a pris quelques initiatives qui adressent les différents nœuds technologiques couvrant la feuille de route du nœud 45nm au nœud 6 nm , au-delà de l'ITRS (voir la figure ci-dessous).

L'esprit général est de maintenir une superposition partielle des objectifs et thématiques afin de faciliter la coordination, le transfert de connaissances ainsi que la continuité entre les programmes et la communication entre les communautés.

Ces différentes initiatives sont traitées via les organisations et nœuds technologiques suivants : SEMATECH (45-32nm), Global Research Collaboration (32-22nm), le Focus Center Research Program (22-16nm), Nanoelectronics Reserach Initiative (11-6nm).

Les seuls acteurs industriels qui ont les moyens de se positionner sur le CMOS Uptime (vers la fin de l'ITRS) sont Intel, AMD et IBM avec l'aide du réseau des Universités américaines (Berkeley, Stanford, UCLA, NCSU, MIT, Cornell, University of Texas Austin, ...). Les aspects équipements étaient, jusqu'à 2006, traités dans SEMATECH. Depuis 2006, le centre de gravité s'est déplacé vers le CNSE (College of Nanoscale Science and Engineering) de l'Université d'Abany, qui est devenu véritablement le principal centre de nanoélectronique et nanotechnologies de l'Etat de New York. Il dispose d'un investissement de 4,2G\$ et de 6000m² de salle blanche en classe 1

permettant de traiter des plaquettes de silicium de 300mm de diamètre. Ce complexe réunit, sous l'égide de l'Université d'Albany et de l'Etat de New York, IBM, AMD, Freescale ainsi que des équipementiers tels que AMAT, TEL, ASML, et a vu SEMATECH se joindre à eux récemment. C'est un excellent exemple de coopération incluant l'éducation, la recherche et la possibilité de spin offs. Aujourd'hui, environ 2000 personnes travaillent sur ce centre, et de nombreux chercheurs en nanoélectronique d'IBM s'y sont déplacés.

SRC, DARPA et NSF sont les principaux acteurs du financement des recherches en CMOS Ultime. Pour l'instant, ni la maturité des nouveaux concepts de dispositifs, ni l'intégration de nouveaux matériaux ne permettront de prendre la relève du CMOS ultime. De façon progressive, les diverses voies à explorer, voire généraliser, peuvent être énumérées de la façon suivante (certaines sont déjà mises en oeuvre) :

- les nouveaux concepts en design permettant de gérer la consommation tout en améliorant la vitesse des circuits (asynchronisme, horloges séparées et multicœurs, etc...)
- l'intégration de nouvelles architectures à base de grilles enrobantes (comprenant FinFETs, Trigates, MuGFETs, nanofils,...)
- l'augmentation de densité par le 3D via le « stacking » de cellules ou circuits (type packaging)
- le CMOS 3D exploitant la 3^{ème} dimension afin d'optimiser le layout, le mixage du Si avec d'autres semiconducteurs, Germanium, III-V, graphène, CNT, voire sous forme de nanofils, puisque les dimensions visées à cet horizon seront nanométriques. Dans ce cas, la dissipation thermique ainsi que les capacités parasites peuvent vite devenir des problèmes, limitations dont il faut tenir compte.

Ces solutions permettront de continuer la route du silicium au-delà des dates ultimes extrapolées par l'ITRS (2022), moyennant une augmentation des coûts de fabrication. Elles permettront d'établir le lien avec les nouveaux concepts ou technologies nécessitant des solutions de fabrication matériaux, intégration ou design innovants tout en introduisant les nouveaux dispositifs ou concepts (nanofils, spintronique, nanotubes de carbone, ordinateur quantique, graphène,...).

Ce sont donc les Focus Centers (FCRP) qui adressent ces problématiques, constituant un ensemble d'outils décrits dans le chapitre consacré aux financements. Ce programme finance 38 universités dans 19 états, 200 enseignants-chercheurs, et plus de 400 étudiants. Il est financé par le DOD, la DARPA, la SIA (association des fabricants de circuits), et les équipementiers de l'industrie des semiconducteurs (AMAT, NOVELLUS, ...), et il est géré via le MARCO.

Objectif de la Nanoelectronics Research Initiative : « A l'horizon 2020, découvrir et mettre en pratique (preuve de concept) via un transfert technologique dans l'industrie, de nouvelles technologies de dispositifs non CMOS, ou de nouveaux paradigmes de fabrication, qui prendraient le relais du CMOS en termes de continuité de la tendance historique de baisse du coût par fonction, s'accompagnant de l'augmentation des performances et de la densité sur plusieurs ordres de grandeurs au-delà des limites du CMOS » (Bill Clinton 2000)

4. LA SPINTRONIQUE

La découverte de la magnétorésistance géante (GMR) par les équipes d'Albert Fert et Peter Grünberg en 1988 a conduit à une révolution dans la conception des têtes de lecture des disques durs dès 1997 et a été un facteur déterminant dans la réduction de leur dimension. C'est d'ailleurs un modèle d'école qui montre comment une recherche très fondamentale peut mener à une application importante et ce, dans des délais remarquablement courts.

L'augmentation de l'effet GMR qui, à sa découverte n'était que de quelques pour cent, permet également d'envisager son application pour d'autres dispositifs. Cette augmentation a tout d'abord consisté à passer d'un système de résistance en série à un système utilisant une barrière tunnel, engendrant ainsi une augmentation de quelques pour cent à quelques dizaines de pour cent. Le gros effort sur la qualité des matériaux et de l'interface a ensuite permis d'atteindre plusieurs centaines de pour cent actuellement.

Les dispositifs les plus étudiés pour d'autres applications que les têtes de lecture sont les mémoires. Les effets magnétiques ont été utilisés depuis très longtemps pour la conception de mémoires: les mémoires dites à bulles des années 60 en sont un exemple. Dans le cas de la GMR, les forts champs coercitifs des matériaux magnétiques utilisés permettent des temps de maintien extrêmement longs, plusieurs années, ce qui veut dire que, contrairement aux DRAM qui utilisent des capacités, elles n'ont pas besoin d'être « rafraîchies » périodiquement. Ce sont donc des mémoires qui n'ont pas besoin d'énergie pour conserver leur contenu : un ordinateur utilisant de telles mémoires serait fonctionnel quasiment instantanément à la mise sous tension!

4.1. Mémoires magnétiques MRAM

Le principe d'une telle mémoire MRAM est d'avoir une barrière tunnel entre deux couches magnétiques. Si l'aimantation de ces couches est parallèle, le courant qui les traverse est fort, si elle est anti-parallèle ce courant est faible. Pour écrire, il faut donc pouvoir renverser l'aimantation d'une des couches. Dans les MRAM actuelles on utilise pour cela deux courants : un dans la « word line » et un dans la « bit line ». Seule la somme de ces courants est suffisante pour renverser l'aimantation, ce qui permet de sélectionner uniquement le bit à l'intersection des deux lignes. Cette technique implique des limitations très sévères aux MRAM:

- les courants d'écriture sont assez forts (quelques 10mA), ce qui implique une consommation d'énergie importante et donc limite la portabilité (déchargement rapide des batteries),
- deux bits ne peuvent pas être très rapprochés sous peine d'interférence d'adressage (« cross talking ») c'est à dire qu'un bit voisin peut être non intentionnellement retourné. L'intégration est donc limitée, ainsi que la capacité de ces mémoires.

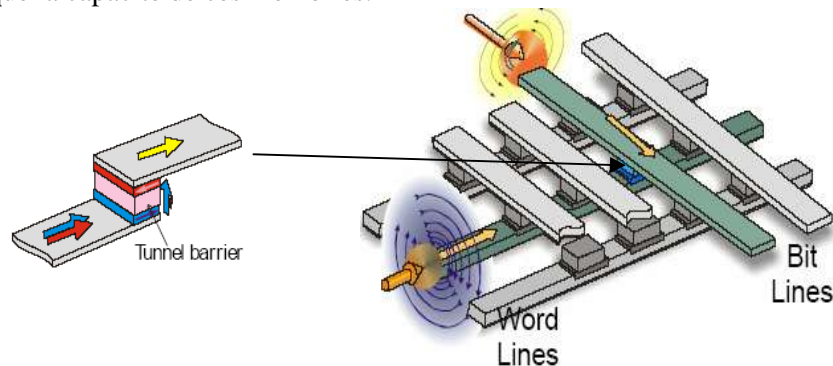


Figure 5 Principe de fonctionnement d'une mémoire magnétique MRAM.

IBM Yorktown (équipe Gallagher) nous a montré sa ligne de production de MRAM 16Mbit en technologie 0.18 μm . La clé du composant est la qualité des couches et des interfaces. Pour cela IBM a développé un bâti de dépôt multichambres (8) qui permet, sur des plaques de 6 pouces, d'effectuer toutes les opérations de dépôt sans sortir les wafers à l'air. La production d'IBM est essentiellement réservée à ses besoins internes, notamment pour ses serveurs hautes performances mettant en œuvre de l'électronique basse température.

IBM est également très actif en amont pour l'amélioration de cette technologie. Beaucoup d'efforts sont faits en direction du retournement de l'aimantation par transfert de spin. L'idée est d'utiliser un courant d'électrons polarisés en spin par une première couche magnétique dite « polariseur », pour forcer la direction de l'aimantation de la seconde couche qu'ils traversent ensuite. Ce mécanisme est prépondérant dans les piliers de petit diamètre (<100nm). Plus difficile à mettre en œuvre, ce mécanisme permet de s'affranchir des problèmes de « cross-talking », et les chercheurs d'IBM Almaden, notamment le groupe de Stuart Parkin que nous avons visité, espèrent également en tirer parti pour diminuer la consommation énergétique. Dans ce laboratoire, l'effort est encore mis sur le matériau et la qualité des interfaces. Un bâti pour substrat 1 pouce a été spécialement conçu pour déposer un ensemble de matériaux par pulvérisateur magnétron, EJM, LBD, canon à électron ainsi que des analyses in situ telle que XPS, SIMS, EELS etc ...

4.2. Les mémoires non volatiles concurrentes des MRAMs

4.2.1. Le racetrack

Le groupe d'IBM Almaden travaille également sur une nouvelle architecture de mémoire appelée « racetrack ». Le principe est simple, il s'agit de déplacer l'aimantation de domaines par un train d'impulsions de courant. La piste est structurée de façon à ce que les parois de domaines soient bloquées dans des intervalles réguliers déterminés. Une ligne de courant permet d'écrire dans un domaine et une jonction tunnel permet de lire la valeur. Cette architecture a un potentiel d'intégration très important.

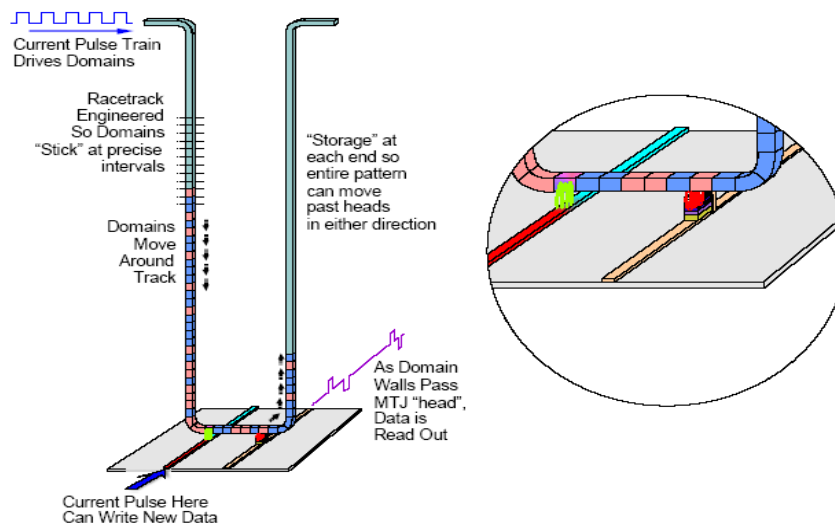


Figure 6 Principe de fonctionnement de la mémoire « racetrack » développée à IBM Almaden.
Crédits : Gianluca Bona, IBM Almaden

4.2.2. Les mémoires à changement de phase

Une autre alternative aux MRAM pour le futur des Mémoires Non Volatiles (MNV) consiste à générer, par un courant, un changement de phase dans un matériau, entraînant à son tour une modification de sa résistance. La géométrie de lignes croisées est généralement adoptée pour cette technologie, ainsi que des architectures à base de GeSb_xTe_y (prototypes de 512Mbit chez Samsung, IEDM 2006).

Le laboratoire HP à Palo Alto travaille depuis quelques années sur un prototype qui utilise du $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ ou du TiO . Aujourd'hui, le TiO est surtout regardé comme un bon intermédiaire entre le HfO_2 et le BST pour les capacités DRAM. Son intérêt comme matériau à changement de phase est récent. Il s'agit en fait d'un matériau NiO dopé Ti , qui sert de résistance variable par migration d'ions métalliques.

Dans le dispositif de HP, des courants de quelques dizaines de microampères sont suffisants pour générer le changement de phase qui modifie la résistance de plusieurs ordres de grandeur. Pour que les courants soient faibles et le changement de résistance important, il faut que les dimensions des structures soient très petites (<100nm). Le système consiste en des lignes croisées, le matériau actif étant déposé entre les deux niveaux de lignes.

Un des objectifs de HP étant également la diminution de ses coûts, le laboratoire de Stanley Williams a développé et construit en interne une machine de nanoimpression. Le problème rencontré par les chercheurs réside essentiellement dans la robustesse du stockage de l'information. En effet, à l'heure actuelle, la persistance de ses mémoires et surtout les effets de vieillissements sont trop importants pour permettre une production industrielle.

Philip Wong à Stanford travaille également sur les mémoires à changement de phase. Il explore plusieurs voies pour en réduire les tailles :

- Utiliser des nanofils semiconducteurs obtenus par croissance catalytique sur des nanoparticules d'or. Le matériau à changement de phase (par exemple GeSb_2T_5) est ensuite déposé sur les nanofils, ainsi qu'une électrode de mesure.
- Utiliser un lift-off de matériau à changement de phase à l'aide d'un système auto-organisé, par exemple un copolymère diblock PS-PMMA qui permet d'obtenir des trous de 15 à 20nm.
- Élaboration par synthèse chimique de nanoparticules, GeSe par exemple, dont les diamètres peuvent être inférieurs à 10nm et qui présentent des effets d'auto-organisation lorsqu'elles sont déposées sur un substrat.

Ces études permettent également d'étudier les phénomènes de changement de phase à des tailles nanométriques pour trouver le système présentant une bonne persistance et peu d'effet de vieillissement.

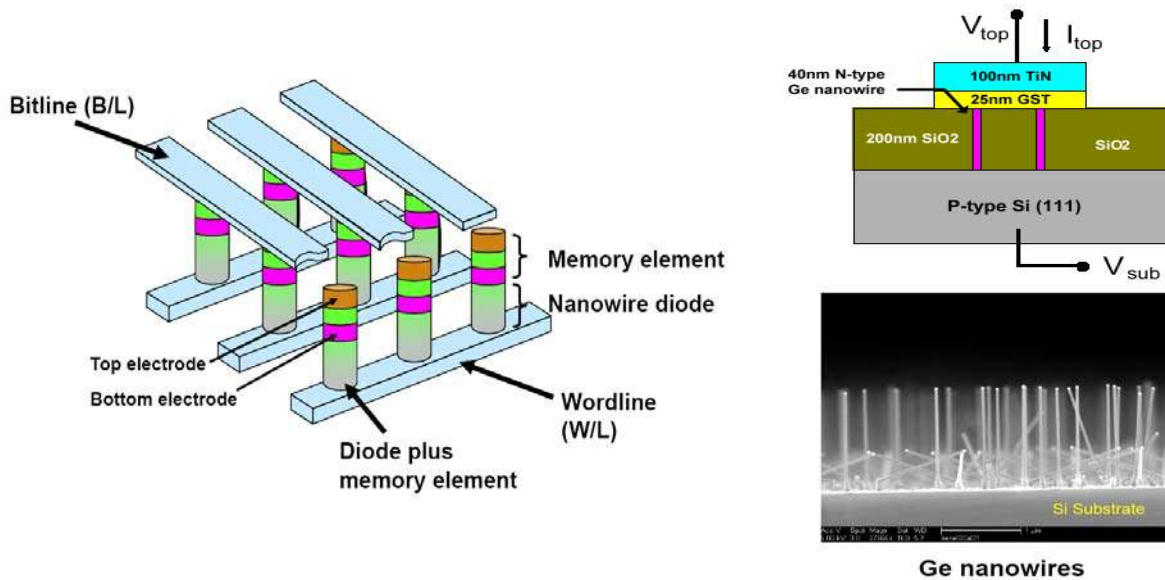


Figure 7 Réseau de mémoires « crossbar » à base de nanofils à changement de phase (haut). Intégration dans un composant à l'aide de nanofils de Ge (bas). Crédits : Philip Wong, Stanford University.

4.2.3. Les mémoires ferroélectriques

Encore une fois, l'idée est très simple: Dans un transistor de type FET, la grille est remplacée par un matériau ferro-électrique, lui-même recouvert d'une grille. Une impulsion de tension positive sur la grille polarise positivement le ferro-électrique à l'interface avec le semiconducteur et rend le transistor passant, alors qu'une impulsion négative bloque le transistor, en polarisant le ferro-électrique en inverse. On a donc à la fois, un effet mémoire, et un effet transistor, ce qui permet de diminuer considérablement le nombre de transistors dans les mémoires et donc la taille et la puissance consommée. Malheureusement, pour ces mémoires, les effets de vieillissement sont généralement prépondérants. Le CRISP à Yale essaie, par exemple, d'utiliser des monocristaux ferro-électriques plus robustes.

4.3. Le système universitaire de nanofabrication

Le programme SRC, piloté par les industriels nord américains, s'appuie sur un réseau d'universités pour mener ses recherches les plus amonts. Chaque université a sa propre salle blanche de taille relativement moyenne, typiquement 1000m². L'idée est que le candidat pour le remplacement du CMOS est loin d'être identifié. Il faut donc mener des recherches tous azimuts dans des structures les plus flexibles possibles. Le financement de la construction de ces centres peut provenir des différents programmes. Toutefois Harvard s'est construit sa salle blanche avec ses propres fonds!

PME et universitaires ont accès à ces structures moyennant une participation aux frais. Par exemple la salle blanche du MIT demande un ticket d'entrée de \$1400 par an et par chercheur (une somme plus importante dans le cas d'industriels). Le fonctionnement de ces salles blanches est assuré par une équipe assez réduite de techniciens qui assurent l'entretien des infrastructures et des différentes machines. Les process sont donc faits par les étudiants, post-docs, chercheurs ou industriels eux-mêmes. De fait, beaucoup de non permanents assurent la création ou l'évolution des process avec le risque toutefois de perdre le savoir faire avec la rotation des non-permanents. Il semble que la durée des PhD de cinq années au moins permette de réduire cet aspect négatif.

5. L'ÉLECTRONIQUE MOLECULAIRE

L'électronique moléculaire offre principalement deux perspectives à un traitement de l'information post-CMOS. La première, issue du paradigme proposé par Aviram et Ratner en 1974,⁷ propose de confier à une molécule individuelle le soin de moduler le transport électronique. Elle remplit alors le rôle "post-silicium" d'une diode, d'un fil voire d'un transistor moléculaire pour une architecture envisagée qui reste néanmoins fondamentalement de type CMOS. La seconde, proposée en 1984 par F. Carter,⁸ suggère de s'affranchir des concepts de l'architecture CMOS reposant sur l'assemblage de transistors en portes logiques elles-mêmes cascadées en fonctions supérieures capable de calculer, pour confier à un système moléculaire plus complexe le soin de réaliser en interne une fonction de calcul et d'interfaçage avec N entrées/sorties. Dans ce cas, la logique booléenne serait conservée mais la topologie moléculaire "post-CMOS" n'aurait aucune raison de ressembler à l'architecture des processeurs en silicium d'aujourd'hui.

De manière évidente, la première option fait, depuis 30 ans, l'objet du principal effort de recherche. Il s'agit de développer la chimie, la technologie et la théorie nécessaires à la compréhension des phénomènes de transport électronique au sein de quelques ou une seule molécule placée entre deux électrodes, en général métalliques. Les défis restent nombreux dans les trois axes: quelle molécule synthétiser pour optimiser un comportement électronique visé une fois placée entre des électrodes? Comment fabriquer puis mesurer des jonctions électrode - molécule unique - électrode qui sondent la molécule? Comment interpréter une caractéristique courant-tension en fonction de la structure de la molécule? Les travaux menés dans ce domaine concernent alors aussi bien des molécules que des objets nanométriques qui s'en approchent et servent de systèmes-test, tels les nanotubes de carbone, le graphène ou les polymères. Au cours de la mission, les laboratoires visités s'attellant aux questions d'électronique moléculaire se placent résolument dans cette première option.

La seconde option est plus délicate à aborder car les règles de fabrication et de fonctionnement de systèmes complexes à fonction évoluée restent à découvrir. En pratique, seules quelques options ont été explorées par le calcul et les premières tentatives expérimentales commencent timidement à apparaître. Là aussi, des objets plus gros mais dont il est pressenti que les propriétés pourront évoluer vers l'échelle moléculaire font figures de bons candidats-tests : nanotubes et graphène.

Au cours de la mission, il n'a malheureusement pas été possible de voir certains des sites les plus à la pointe de l'électronique moléculaire aux États-Unis et, pour une couverture plus large du sujet, le lecteur est invité à se reporter au numéro spécial "Électronique moléculaire aux États-Unis" (juillet 2007) du Dossier Science Physiques États-Unis de la Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France aux États-Unis⁹. Dans la suite nous passerons en revue la position de principe et les résultats présentés par les institutions visitées.

D'une manière générale et malgré la relative discrétion qui entoure l'électronique moléculaire depuis la désastreuse affaire H. Schön (Bell Labs, 2001-2002), non seulement l'effort s'est accru aux États-Unis mais les grandes universités et laboratoires privés continuent de considérer ces concepts comme pertinents pour des solutions post-CMOS. Clairement, l'effort de recherche est concentré sur les aspects les plus fondamentaux et l'horizon donné par D. di Vincenzo (IBM Watson), J. T. Yardley (Columbia University) ou bien P. Gargini (Intel Corp.) situe vers 2025 le début de maturité des concepts moléculaires en électronique.

⁷ Aviram A.; Ratner M. A. Chem. Phys. Lett. 1974, 29, 277.

⁸ F.L. Carter, *Physica D* **10**, 175 (1984)

⁹ Disponible au téléchargement sur http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/2007/smm07_054.htm

5.1. Columbia University

Le Columbia Nanocenter est l'un des 16 centres du NSEC financés par la NNI avec pour mission l'exploration de la nanoélectronique et de l'électronique moléculaire. Il comprend 50% de chimistes et 50% de physiciens/ingénieurs pour un total de 16 professeurs et 75 personnes. Sa mission est de trouver des approches ou systèmes alternatifs pour pallier aux limites fondamentales prévues du C-MOS et incontournables d'ici 2020. Dans sa présentation générale, Jim Yardley (directeur du centre) a résumé les objectifs comme centrés sur l'exploration du transport électronique dans les molécules uniques et les nanostructures moléculaires, c'est à dire la compréhension scientifique fondamentale des phénomènes à l'échelle nanométrique et une opportunité pour de nouveaux dispositifs de processus de l'information. Trois domaines particuliers y sont étudiés: Électronique moléculaire, Matériaux 2D (graphène et SAM), Nanostructures. Toutefois, durant la présentation, seule une petite partie du travail sur les nanotubes, le graphène et les jonctions électrode-molécules-électrode a été abordée.

La spectroscopie optique ultrarapide sur nanotubes monoparoi (SWNT) a été détaillée par **Tony Heinz**. L'étude de SWNT individuels par spectroscopie Rayleigh met en évidence une dépendance en rayon et en chiralité des bandes E33 et E44.¹⁰ Les auteurs démontrent un changement de chiralité tous les 1 mm environ pour des nanotubes formés par CVD. Une approche originale de l'interaction nanotube/nanotubes consiste à suivre le spectre Raman dans des fagots contenant quelques tubes en fonction d'adsorbats comme le pyrène. En présence des molécules, l'interaction est écartée menant à une sorte d'ingénierie diélectrique du gap unidimensionnel.

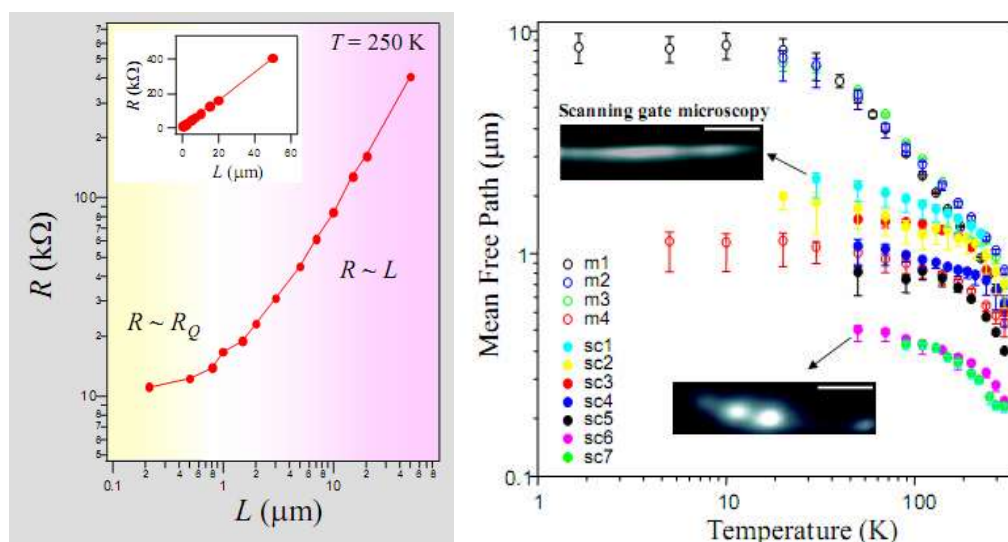


Figure 8 Gauche : Mesures de la résistance d'un nanotube de carbone en fonction de sa longueur. Droite : mesure du libre parcours moyen électronique en fonction de la température. Crédits : Philip Kim, Columbia University.

Ceci rejoint les préoccupations actuelles de **Philip Kim** sur les nanotubes de carbone, le graphène et les composants à base de nanorubans. Son activité couvre les composants à base de nanotubes ou de graphène dans le cadre du programme NRI de Columbia. Concernant les nanotubes, P. Kim a montré qu'au-delà de quelques microns, un nanotube unique mono-paroi à température ambiante avait une résistance proportionnelle à sa longueur déterminant un libre parcours moyen électronique supérieur à $0.2 \mu m$ (souvent $0.5 \mu m$ à température ambiante et pouvant atteindre jusqu'à $10 \mu m$ à basse température (20K) pour les CNT de la meilleure qualité. La pureté du carbone utilisé

¹⁰ Sfeir MY, et al., Science 306 1540 (2004); Sfeir MY, et al., Science 312, 554 (2006)

devient un paramètre crucial. Il a aussi effectué des travaux récents, non présentés, sur des super-réseaux 1D réalisés par une série de grilles périodiquement espacées le long du nanotube montrant des interférences très spectaculaires. Globalement, les composants à nanotubes actuels se comparent aux meilleurs composants en AsGa en 1982 (à basse température).

Le groupe de Kim est leader dans le domaine du transport électronique sur le graphène, avec le groupe de Manchester (R.U.). Un vaste programme alliant les techniques pluridisciplinaires mentionnées ci-dessus permet d'avoir un programme cohérent. Ce programme concerne le transport électronique quantique : limite quantique extrême en fort champ magnétique (effet Hall quantique à température ambiante), des dispositifs montrant des interférence quantiques, des effets de confinement (nano-rubans, boîtes quantiques), de l'électronique quantique de spin, les propriétés optiques (Raman, Infra-rouge), de la caractérisation topographique et électronique par STM sous ultra-vide, des fonctionnalisations chimiques (photochimie, décoration des bords, composés d'insertion du graphite).

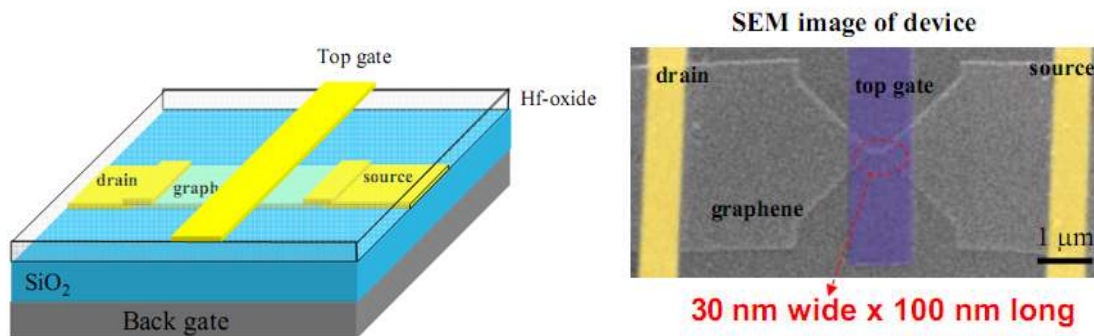


Figure 9 Nanotransistor réalisé dans le laboratoire de P. Kim à l'aide d'une nanoconstriction de graphène recouverte d'une électrode. Crédits : Philip Kim, Columbia university

Pour le graphène, la chiralité n'est plus un critère mais le verrou actuel est le contrôle des états de bord dont on sait qu'ils influencent directement le transport. Pour l'instant, le seul moyen est d'opérer une gravure sèche alignée tant bien que mal par lithographie électronique sur les bords déchirés du feuillet de graphène, les parties actives étant protégées par la résine inorganique HSQ. P. Kim a ensuite présenté les résultats récents sur les nano-rubans et les jonctions p-n. Un des problèmes majeurs du graphène est l'absence de gap séparant trous et électrons. Cependant, ceci peut être résolu avec des nano-rubans dont le confinement dans la direction transverse induit des sous-bandes électroniques dont les énergies sont séparées par un gap proportionnel à l'inverse de la largeur moins une largeur caractéristique.

Un remarquable travail fait sur plusieurs dizaines d'échantillons montre que ce gap atteint 0.3eV (0.1eV) pour 15nm (30nm). Si les propriétés ambipolaires de rubans ainsi connectés peuvent être modulées en même temps que la largeur, il est cependant peu probable que les effets de bords soient les seuls responsables, les dégâts du bombardement ionique pouvant aussi jouer un rôle prépondérant. Contrairement aux prédictions, il ne semble pas y avoir de variation du gap avec la direction cristallographique, là aussi sans doute à cause de la rugosité des bords du nano-ruban. Des constriction contrôlables par grille permettent d'obtenir un fonctionnement on-off à bas courant de 5 ordres de grandeur. Cependant, l'efficacité de la grille, même avec un diélectrique de haute permittivité, est encore faible et aussi, à forte polarisation en tension, le rapport on-off est seulement de 100.

Enfin P. Kim a présenté d'autres travaux avec des jonctions p-n-p en graphène dans le régime d'effet Hall quantique. Actuellement ces mesures sont faites à basse température, mais si on arrive à

atteindre dans un futur proche la mobilité intrinsèque du graphène, des dispositifs à effet Hall quantique à température ambiante pourraient être utilisés en champ permanent modéré.

A noter, l'innovante étude par **Elena Stolyarova** qui caractérise le monofeuillet de graphène déposé sur substrat isolant mais recouverts d'une fine couche métallique par STM.¹¹ Dans une étude réalisée en ultra-vide à température de l'azote liquide elle a montré l'absence de défauts cristallins sur de grande distance (au moins 10nm), une information cruciale sur la compréhension des mécanismes qui limitent la mobilité électronique. Tout aussi important est la comparaison par étude topographique de la rugosité de surface du substrat et de celle du graphène. Alors que les substrats présentent des rugosité de +/-0.2nm sur une échelle de 5 à 15nm, le graphène de par sa rigidité de flexion lisse ces fluctuations pour les ramener de moitié et sur une échelle de longueur caractéristique environ deux fois plus grande. Ceci démontre que le désordre actuel affectant la mobilité (pourtant déjà très grande) du graphène est au moins en partie dû à ces rugosités.

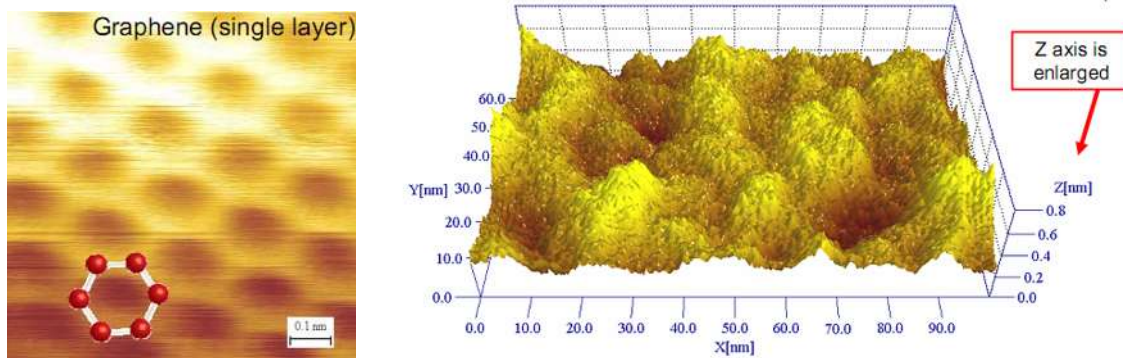


Figure 10 Mesure par STM d'une surface de graphène (gauche) ou on distingue les cycles carbonés, et mesure de la rugosité de surface (droite). Crédits : Elena Stolyarova, Columbia University.

Enfin, dans le cadre des FET, les nanotubes peuvent peut-être apporter des réponses dans les applications capteurs ou de diélectrophorèse intégrée. Par contre, selon **Ken Shepard**, le graphène a un rapport I_{on}/I_{off} trop faible pour pouvoir un jour rivaliser avec les composants silicium et de plus, l'ingénierie du gap semble trop délicate pour permettre de réaliser une véritable modulation du courant. Par contre, certaines applications sont indépendantes du gap, par exemple lorsque l'on cherche une modulation de la transconductance.

Un autre pan de l'activité de Columbia se rapportant à l'électronique moléculaire concerne les études de molécules uniques placées dans des jonctions électrodes-molécules-électrodes par indentation puis rétraction d'une pointe STM dans un substrat en présence d'une solution de la molécule d'intérêt. Lors du retrait, quelques unes puis finalement une seule molécule se retrouve en configuration pontante entre la pointe et le substrat. **Latha Venkataraman** montre qu'il est alors possible de mesurer la conductance de la jonction qui prend une valeur discrète proportionnelle à G_0 , quantum de conductance. En particulier, lorsque pointe et substrat sont en or, la molécule habituelle a un cœur et deux groupes pontants de type thiol (-SH). On constate que les sauts de conductance sont visibles mais de valeur très dispersée. En changeant les fonctions terminales des molécules par de l'amine (-NH₂), les sauts se produisent à une valeur de conductance beaucoup mieux définie et stable. Il devient alors beaucoup plus aisé de faire varier la longueur, la fonctionnalisation et la nature (saturée ou conjuguée) du cœur de la molécule et de distinguer la contribution moléculaire dans les caractéristiques de la jonction.¹² En particulier, la modulation de la transparence par contrôle de la

¹¹ E. Stolyarova, et al., PNAS, 104, 9209-9212 (2007), E. Stolyarova, et al., J. Phys. Chem. 2007

¹² L. Venkataraman, et al., NanoLett, 6, 458-462 (2006). L. Venkataraman, et al., Nature, 442, 904-907 (2006).

conformation moléculaire a été démontrée une nouvelle fois en faisant varier l'angle dièdre entre phényles successifs, confirmant les potentiels transducteurs des composants mono-moléculaires.

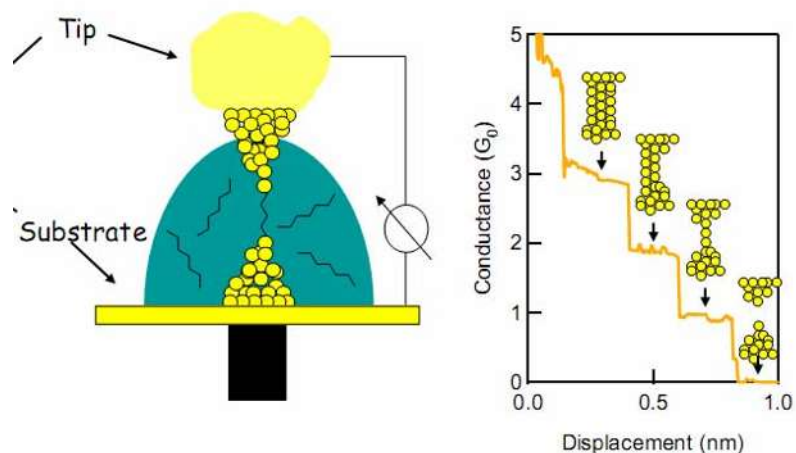


Figure 11 Schéma de principe de l'expérience (jonction à cassure contrôlée mécaniquement) menée par Latha Venkataraman pour mesurer la conductance de différentes molécules en solution. Crédits : Latha Venkataraman, Columbia University

5.2. Laboratoires de recherche IBM (Yorktown et Almaden)

L'analyse de l'ère post-CMOS à IBM présentée par **David di Vincenzo** (IBM Watson à Yorktown) comprend une période CMOS post-silicium couvrant les 15-20 prochaines années jusqu'aux composants à base de nanotubes et de graphène, la suite étant fondée sur l'électronique moléculaire ou le calcul quantique. La recherche en nanosciences la plus exploratoire dans les laboratoires de IBM Watson concerne les composants à nanotubes, graphène ou à fils semi-conducteurs (transistor à grille enroulée) et les composants spintroniques (capteurs, mémoires, circuits logique). La partie électronique moléculaire et atomique est partiellement explorée à IBM Almaden (ADN, G.M. Walraff; STM, D. Eigler) mais aussi à IBM Zürich (G. Meyer).

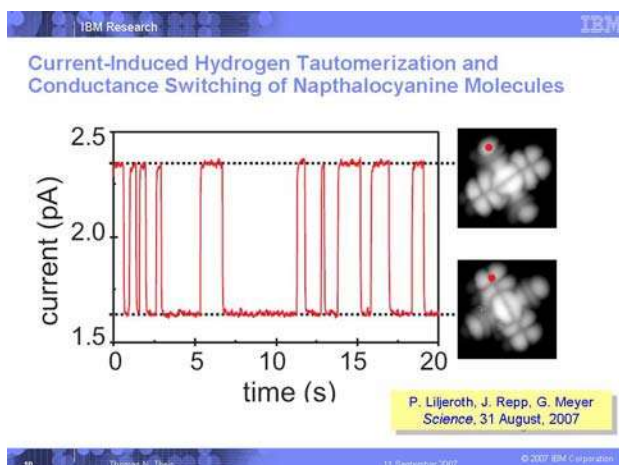


Figure 12 Exemple de recherches en électronique moléculaire menées à IBM, concernant la modification induite électriquement de la structure de molécules organiques. Crédits : David Di Vincenzo, IBM Yorktown

Complétant la présentation de D. di Vincenzo, **Gian-Luca Bona** (Almaden) a décrit les évolutions de IBM en matière de recherche depuis les années 1970 (centralisme), jusqu'à présent (eBusiness research (services), y compris hors du champ de compétence premier, par exemple dans le domaine de la santé, qui représente 50% de la recherche). Cela étant, IBM conserve une activité de recherche et de prospective en matériaux, nanostructures et composants avec un portefeuille de stratégies post-CMOS: calcul quantique, spintronique, électronique moléculaire et atomique, photonique, et même nanostructuration à ADN. Ces options reposent sur le maintien d'une culture scientifique de pointe dans le domaine des nanosciences depuis la manipulation atomique par STM (Don Eigler), la détection de spin électronique individuel (Dan Rugar) ou la nanostructuration de surface par auto-assemblage d'ADN (Gregory M. Walraff, collaboration P.W.K. Rothmund, Caltech). Seuls ces deux derniers ont présenté leurs travaux, l'équipe de D. Eigler nous ayant fait une visite du laboratoire.

Initiée par Phaedon Avouris, la recherche à IBM sur les composants à base de nanotubes a été présentée par **Yu-Ming Li** (IBM Yorktown). Cette recherche se place clairement dans une approche post-silicium du CMOS dans laquelle le canal d'un transistor est constitué d'un nanotube ou, depuis peu, d'un ruban de graphène. Cette dernière évolution constitue manifestement une part conséquente des expériences en cours mais n'a pas été présentée en détail. La somme de résultats acquis par ce groupe sur les transistors à nanotubes depuis 2001 leur permet d'avoir une connaissance fine de ces composants: comportement n, p ou ambipolaire, sensibilité du transport aux gaz ambiants et application aux capteurs.

Les performances des CNT-FET désormais démontrées soutiennent la comparaison avec les transistors MOS en silicium avec des longueur de canal de 50 nm permettant d'atteindre des pentes sous le seuil de 70 mV/dec avec une tension de grille d'actuation de 0.8V et des courants I_{ON} par unité de longueur de canal de 2 à 6 fois plus élevés que leur équivalent silicium.¹³ L'intégration hybride CNT-CMOS est également envisagée pour faciliter l'incorporation de nanotubes dans les procédés actuels. Un oscillateur à 5 étages a été démontré, qui permet d'atteindre des fréquences de plus de 70 MHz. Toutefois l'amélioration des performances passe nécessairement par une meilleure compréhension du fonctionnement intime des composants et, en particulier, l'origine des fluctuations dans les transistors à nanotubes. Celles-ci proviennent de la superposition d'un bruit thermique et d'un bruit en 1/f. Cette dernière contribution est notablement amoindrie en supprimant le substrat pour conserver un nanotube suspendu comme canal.¹⁴

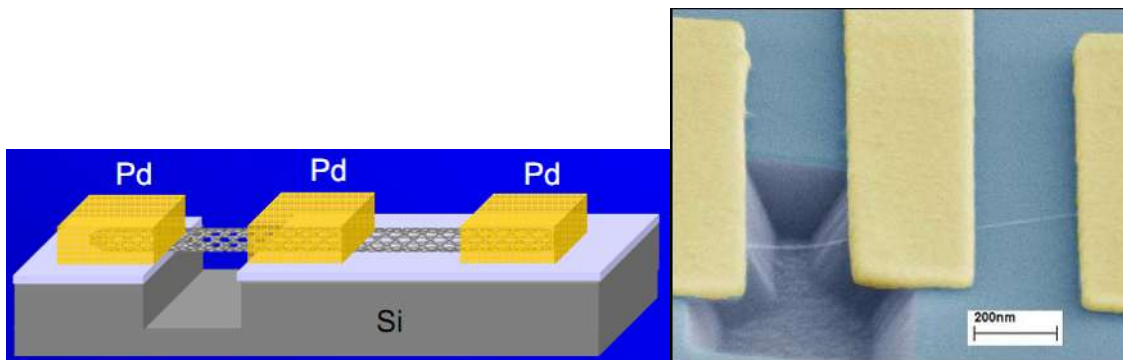


Figure 13 Composant à nanotube de carbone suspendu, permettant d'améliorer le bruit des nanotransistors. Crédit : Yu-Ming Li, IBM Watson.

¹³ A. Javey, D. Farmer, R. Gordon and H. Dai, "Proc. SPIE, 5732, 14 (2006). Guo et al., IEEE Trans. on Nanotechnology, vol. 4, p. 715, 2005.

¹⁴ Lin et al., Nano Lett. 6, 930 (2006); Nanotechnology 18, 295202 (2007)

Marcus Freitag a présenté l'étude des propriétés optoélectroniques des nanotubes de carbone sous deux aspects principalement: l'émission résolue spatialement et temporellement et l'imagerie Raman des barrières Schottky. Lorsque les épaisseurs d'oxyde de grille deviennent plus fines, les CNT-FET ont un comportement ambipolaire qui leur permet de transporter à la fois des électrons et des trous. En cas de transport simultané, une recombinaison est possible qui donne lieu à l'émission d'un photon. Sous contrôle de la tension de grille, cette émission peut être localisée proche de la source ou du drain. L'équipe de M. Freitag a démontré qu'il pouvait imager cette émission en la résolvant spatialement et temporellement le long de nanotubes de plusieurs dizaines de microns de long.

De plus, dans le cas de transistors unipolaires, les courants plus importants obtenus donnent lieu, lors de collisions des porteurs de charges avec des défauts à une émission IR également imagée.¹⁵ A l'inverse, dans des transistors ambipolaires, l'éclairage du nanotube génère un photocourant. En mesurant le photo-courant en fonction de la position du point focal du laser le long du nanotube, on obtient une carte du photo-courant qui renseigne sur les défauts dans le nanotube (par corrélation avec l'imagerie micro-Raman ou les barrières Schottky).¹⁶ On peut ainsi postuler que la spectroscopie Raman, au-delà d'être une sonde locale et non-invasive d'étude des phonons, pourrait être utilisée pour accéder directement aux comportements électroniques. Il est à noter que les structures transistor obtenues pour les études optoélectroniques, avec des tubes multimicrométriques, sont assez différentes de celles donnant les meilleures performances en FET et qui ont des longueurs de canaux de quelques centaines de nanomètres.

Suivant une approche radicalement différente, et assez étonnante dans la culture d'IBM, **Gregory M. Walraff** (Almaden) a décrit les fruits d'une collaboration avec P.W.K. Rothmund (Caltech) qui propose de nanostructurer des surfaces par positionnement contrôlé de motifs d'ADN préformés. L'approche de Rothmund, dans la lignée des travaux de N. Seeman (New-York University), consiste à synthétiser un long brin simple d'ADN suivant une séquence comportant, à des emplacements bien déterminés, des paires de blocs topologiquement liés. Par ailleurs, il synthétise des brins simples d'ADN courts ("agrafes") pour moitié complémentaire à chaque membre d'une paire de blocs topologiquement liés.

Le mélange du brin long et des agrafes résulte en un repliement déterministe de la structure partiellement double brin qui génère alors une nanostructure plane à motif précis. La contribution d'IBM consiste alors à développer des méthodes de fonctionnalisation de surface basées sur le contraste hydrophile/hydrophobe, le greffage de thiols sur or, ou la reconnaissance biotine/streptavidine afin de positionner les motifs ADN en des endroits choisis du substrat. Si la motivation du développement d'architectures 2D non-CMOS est évidente, la nature de l'architecture alternative n'est pas encore révélée et les résultats, quoique très solides et prometteurs, restent préliminaires. Il semble, par ailleurs, que si changement de paradigme architectural il doit y avoir, il viendra probablement d'une réflexion sur la topologie des nanostructures ADN, la partie physico-chimisorption spécifique étant relativement usuelle.

L'encodage de l'information sur un seul type de spin nucléaire est une technique ancienne, grâce à la résonance magnétique nucléaire, dont l'application publique la plus répandue est l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et dont les principes font partie des possibles approches du calcul quantique. Toutefois, l'encodage sur un seul spin nucléaire pose un défi de lecture. Le groupe de **Dan Rugar** a mis au point une technique de microscopie de champ proche par résonance magnétique qui permet d'envisager une réelle microscopie tridimensionnelle permettant une résolution sub-moléculaire, même en dessous de la surface.

¹⁵ Freitag et al., Nano Lett. 4, 1063 (2004); M. Freitag et al. Nano Lett. 6, 1425 (2006); J. Chen et al., Science, 310, 1171 (2005)

¹⁶ M. Freitag et al., Appl. Phys. Lett. 91, 031101 (2007). M. Freitag et al., Nano Lett. 7, 2037 (2007).

Le principe consiste à immerger l'échantillon dans un champ magnétique radiofréquence (~ 100 MHz) et de balayer une pointe magnétique qui crée un gradient de champ très abrupte (entre 2 et 40 G/nm) de sorte que la résonance magnétique ne se produit que dans une coquille sphérique très restreinte autour de la pointe. A l'heure actuelle, la limite de détection est une force de l'ordre de 1 aN (10^{-18} N) exercée sur la pointe ce qui, à 2 G/nm, correspond à un spin électronique. Pour mesurer un seul spin nucléaire, un gradient 100 fois supérieur et une sensibilité en force 10 fois supérieure seront nécessaires. L'heure actuelle, Cette technique permet actuellement de détecter des ensembles de 1000 spin nucléaires. Les implications de cette technique, tant pour la résolution de structures tridimensionnelles de molécules individuelles que pour l'étude du magnétisme de molécules-aimants uniques, sont potentiellement très importantes. En particulier, dans ce dernier cas, les outils de mesures sur molécules uniques font encore défaut, malgré la récente démonstration du nano-SQUID à nanotube.

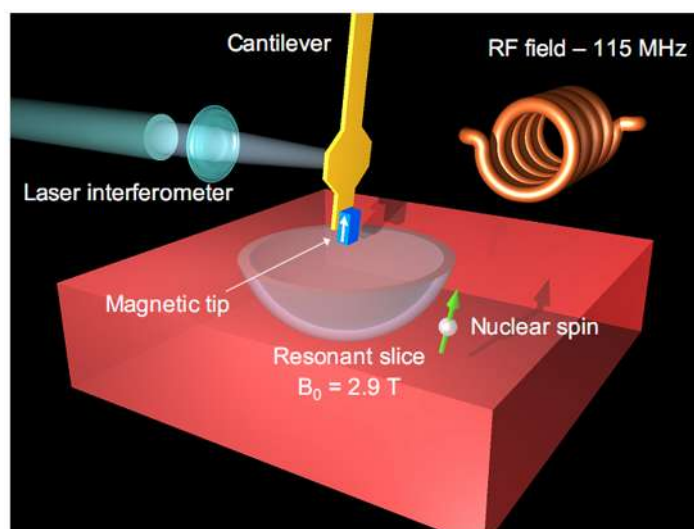


Figure 14 Principe de fonctionnement de l'expérience de microscopie de champ proche par résonance magnétique, menée à IBM Almaden. Crédits : Dan Ruger, IBM Almaden.

5.3. Laboratoires HP (Palo Alto)

Sans réelle mise en perspective de l'approche post-CMOS de HP dans son ensemble, le groupe "Quantum Research Science" dirigé par R. Stanley Williams, nous a été introduit par **David Fattal**. Quatre thématiques semblent constituer la recherche fondamentale post-CMOS: (i) le système, déjà ancien, du cross-bar développé dès 2000 avec J. Heath et P. J. Kuekes; (ii) la combinaison d'une circuiterie CMOS fiable avec un étage auto-assemblé pour une logique probabiliste adaptative; (iii) les nanofils de silicium et (iv) le calcul quantique utilisant les centres N-V (agrégats d'azote) sur du diamant.

Depuis plusieurs années, les HP Labs contribuent au domaine de l'électronique moléculaire par l'intermédiaire d'un système de jonctions électrodes-molécules-électrodes dans lesquelles des réseaux de fils métalliques parallèles sont fabriqués par lithographie standard sur un substrat. Des molécules choisies (souvent de la famille des rotaxanes développées par F. Stoddard, UCLA) sont auto-assemblées en couches moléculaires sur les fils puis un réseau de fils perpendiculaires aux premiers est fabriqué par-dessus pour compléter la jonction. Après les premiers résultats faisant état d'une commutation des molécules entre un état de faible transparence ("isolant") à un état plus transparent ("conducteur") à une jonction arbitrairement choisie de la grille, le groupe avait développé un algorithme de traitement des données suivant le principe du Teramak.

Compte-tenu des possibles artefacts lors de l'évaporation des électrodes supérieures (notamment la diffusion du métal à travers la couche moléculaire créant des courts-circuits nanométriques, ou bien la diffusion de particules de titane oxydé provenant de la couche d'accroche dans la couche moléculaire), **Wei Wu** a présenté l'approche alternative récente consistant à fabriquer les fils métalliques par nano-imprint dont les meilleures performances atteignent un réseau de 128x128 fils avec 34 nm de pas entre fils de 6 nm de large. Cette méthode de transfert de fils métalliques pré-formés sur la monocouche moléculaire est sensée éviter la diffusion métallique lors de la fabrication.

Toutefois la granularité des fils obtenus par nano-imprint ne permet pas de s'affranchir de l'électromigration induite lors de l'utilisation des jonctions. D'ailleurs, deux points viennent corroborer cette inquiétude: une hystérèse est observée lors du balayage en tension permettant la commutation de l'état "1" à l'état "0" mais elle n'est pas expliquée. D'autre part, il semble qu'il faille "former" le réseau, jonction par jonction en lui faisant subir une étape de préparation au cours de laquelle la tension appliquée est ajustée jusqu'à obtenir une commutation dans des conditions similaires à ses voisines. Enfin, le groupe semble désormais se passer de la monocouche moléculaire pour considérer des jonctions métal-TiO₂-métal. Dès lors l'activité de HP sur les grilles ne relève plus de l'électronique moléculaire mais des mémoires à changement de phase dont un exposé complet nous a été fait par **Bulent Kurdi** (IBM Almaden).

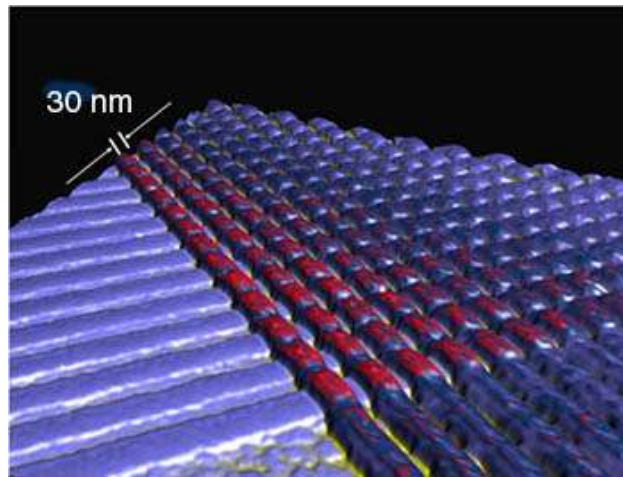


Figure 15 Micrographie électronique montrant une mémoire 66x66 de 4kb réalisée par nanoimprint en 2004 aux laboratoires HP. Crédits : S. Williams, Hewlett Packard.

Le groupe poursuit également sa réflexion sur des logiques non-CMOS, voire non-booléennes, ce qui reste relativement rare parmi les institutions visitées qui s'appuient presque exclusivement sur le dogme de l'architecture CMOS, fusse avec des matériaux autre que le silicium. **G. Snider** nous a présenté l'idée de "nanocrumminess" selon laquelle il deviendra difficile de réaliser de la logique digitale booléenne en utilisant des systèmes moléculaires défectifs.

Une approche alternative consiste à combiner des composants potentiellement défectifs mais en réarrangement dynamique et en interaction dynamique avec des systèmes externes capables de raisonner suivant une logique probabiliste. Dans ce cas, il devient superflu de vouloir corriger les défauts des composants (par ex. moléculaire) mais il faut mettre en place un cycle d'apprentissage pour chaque tâche donnée. Le réseau de jonctions croisées présenté précédemment pourrait être un exemple où chaque jonction devient l'équivalent d'une mémoire synapse. A terme s'il est possible d'interfacer m composants reconfigurables et bon marché avec n circuits CMOS servant de nœuds de réseau, avec le rapport m/n supérieur à 100, alors on prédit que le système hybride pourrait devenir pertinent à la mise en place de réseaux neuromorphiques.

6. NANOÉLECTRONIQUE QUANTIQUE ET PHYSIQUE MESOSCOPIQUE

6.1. Introduction

La compréhension quantique de la conduction est au cœur des nombreuses recherches parallèles menées sur de nouveaux matériaux dans la perspective d'une alternative au CMOS. Pratiquement, la nanoélectronique est quantique quand la taille des composants devient inférieure à la longueur de cohérence quantique l_ϕ des porteurs. Pour les conducteurs ou semi-conducteurs usuels l_ϕ vaut typiquement quelques dizaines de nanomètres à température ambiante mais peut atteindre la centaine de nanomètres pour des conducteurs très fortement balistiques (nanotubes de carbone (CNT), graphène, quelques hétérojonctions III-V). Les concepts pertinents pour décrire la conduction dans ce régime ont été établis en physique mésoscopique, une branche de la physique qui s'est développée dans les années 80. Afin de mieux révéler les effets quantiques, les matériaux utilisés ont d'abord été placés à très basse température où l_ϕ peut atteindre quelques microns ou même dizaines de microns. Les résultats obtenus s'appliquent à température ambiante pour les récents matériaux intermédiaires entre une molécule et un semi-conducteur tels le graphène ou les nanotubes de carbone, les nano-fils, ou encore pour l'électronique moléculaire, et prennent alors toute leur utilité.

Au début des années 1980, les physiciens se sont appropriés les techniques de la micro-électronique pour explorer la conduction sur des échelles de longueurs comparable à l_ϕ . Comme très souvent, l'observation a rapidement fait progresser la compréhension théorique et il est apparu une description simple et élégante de la conduction en termes de transmission des ondes électroniques, dont l'achèvement a été la formule de Landauer qui relie la conductance d'un matériau normalisé au quantum de conductance e^2/h , à la somme des probabilités de transmission des électrons à travers le matériau. Une nouvelle branche de la physique naissait ainsi: la physique mésoscopique.

Son essor durant les deux décennies suivantes a préparé le terrain aux enjeux actuels et futurs de la nanoélectronique. Pressentant l'importance de ces recherches pour l'électronique du futur, des laboratoires privés comme IBM Yorktown, mais aussi Bell Labs, n'ont pas hésité à développer cette activité fondamentale jusqu'au début des années 90. Ce sont en particulier dans les laboratoires d'IBM qu'ont été établies les lois modernes qui régissent le transport électronique quantique. La simplification considérable des concepts a permis de stimuler l'inventivité des chercheurs et a attiré les meilleurs éléments. Ces derniers ont appliqué et testé ces concepts à des objets de plus en plus petits, mais aussi plus quantiques, pour atteindre l'échelle nanométrique voire atomique ou moléculaire. Plus récemment, ils les ont appliqués à de nouveaux degrés de liberté comme le courant de spin pour la spintronique. En chemin la réduction de taille a fait apparaître de nouveaux effets. La quantification de la charge a donné le transistor à un électron avec des applications en métrologie. Sa variante supraconductrice, la boîte à paire de Cooper, trouve des applications en information quantique bien que contraintes aux très basses températures. La quantification des niveaux d'énergies d'électrons observée dans des boîtes quantiques, d'abord à basse température, a permis de jeter les bases de la spectroscopie tunnel utilisée aujourd'hui pour comprendre la conduction à travers un nanotube ou une molécule, version ultime de la boîte quantique. Enfin, en suivant un parallèle avec le développement de l'optique quantique, la compréhension du bruit quantique du courant a amené à s'intéresser aux interférences plus complexes et à imaginer d'implanter des éléments d'information quantique dans les conducteurs.

De nouveaux conducteurs de basse dimension, plus purs et plus contrôlables, ont joué un rôle considérable pour développer la compréhension des mécanismes quantiques électroniques. D'abord, les conducteurs bidimensionnels (2D) comme les Si-MOSFETS ou les hétérojonctions de conducteur

III-V, puis les conducteurs unidimensionnels (1D) obtenus en réduisant latéralement la taille des premiers (fils quantiques, nanofils, CNT) puis zéro-dimensionnels (boîtes quantiques) où les électrons sont complètement confinés. Dans le souci de travailler à des températures de plus en plus élevées, les progrès en nanolithographie et la maîtrise de plus en plus fine de nano-objets par technique microscopie en champ proche comme le microscope à effet tunnel (STM), inventé à IBM (Zürich) ou le microscope à force atomique (AFM), ainsi que la convergence avec les chimistes ont amené à étudier le transport électronique quantique à l'échelle moléculaire et atomique et à vérifier l'universalité de la description du transport en terme de transmission d'ondes électroniques.

Actuellement, les matériaux connus les plus prometteurs en nanoélectronique quantique et capables de s'intégrer au CMOS, voire de remplacer le C-MOS pour certaines fonctions, sont les nanofils de semi-conducteurs, les nanotubes de carbone et tout récemment un conducteur 2D ultime car d'épaisseur monoatomique : le graphène. Les nanofils héritent des propriétés semi-conductrices du matériau massif et leur diamètre réduit permet une élimination rapide des défauts de croissance sur les bords leur conférant un ordre cristallin très supérieur. Les Nanotubes de Carbone (CNT) sont une feuille de graphène courbée sur elle-même pour former un tube. Ils sont très robustes chimiquement et mécaniquement, peuvent soutenir des densités de courant record (quelques dizaines de micro-ampères concentrés sur un diamètre de quelques nanomètres).

Les CNT peuvent être métalliques ou semi-conducteurs, ces derniers étant les plus intéressants dans le contexte post C-MOS. Pour des longueurs inférieures à un micron leur conductance atteint la limite la plus basse imposée par la physique quantique : soit $e^2 / 4h$ ($\sim 1/6k\Omega$) car la diffusion des électrons sur les impuretés est supprimée en vertu d'une symétrie particulière dite de chiralité. La même propriété s'applique au graphène qui, récemment isolé et contacté, possède une mobilité record à température ambiante, atteignant $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$. Il montre des effets quantiques spectaculaires comme la quantification de la résistance Hall à température ambiante en très fort champ magnétique. Mais l'aventure ne fait que commencer car la mobilité est actuellement limitée par le substrat sur lequel le graphène est déposé alors que de récentes études montrent qu'on peut tabler sur une mobilité intrinsèque 10 fois supérieure à température ambiante, donc des libres parcours moyens supérieurs au micron dans un futur proche. Une véritable révolution est à attendre.

6.2. L'activité aux États-Unis

Elle concerne particulièrement l'étude des nanotubes de carbone (CNT), le graphène, les nanofils, et encore des conducteurs 2D à base d'hétérojonctions III-V. Les supraconducteurs mésoscopiques avec leurs applications en information quantique, déjà traités dans le chapitre correspondant, ne seront pas mentionnés ici.

Sans pouvoir être exhaustif, il est important de citer les laboratoires suivants, dont seulement quelques-uns ont pu être visités dans le temps imparti.

6.2.1. Côte Est

Maryland University, (College Park, près de Washington), groupe de **Michael Fuhrer** (non visité). Michael Fuhrer est professeur au département de Physique et également directeur associé du Maryland Nanocenter. Son groupe est très actif sur le transport dans les nanotubes et la maîtrise de leur croissance, étude de leurs propriétés fondamentales (mobilité, transport quantique) mais aussi démonstration de fonctionnalités composant (mémoire à un électron à base de nanotube, nanotube transistor à effet de champ, CNT-FET à très forte transconductance). Le groupe étudie aussi le transport à travers des molécules et plus récemment le graphène avec des résultats très intéressants sur la mobilité. A noter aussi une technique de nano-impression permettant de positionner des monocouches de graphène dans un circuit.

Cornell University (Ithaca NY), groupe de **Paul McEuen** (non-visité). Paul McEuen était basé à Berkeley jusqu'à très récemment. Venu de la physique mésoscopique, il s'est attaqué dès le milieu des années 90 au transport dans des objets nanométriques (transistor à un électron fait d'un nanocristal CdS positionné entre une jonction à cassure atomique). Ensuite, il a développé le transport électronique et la nano-électro-mécanique avec des nanotubes de carbone et plus récemment le graphène. Il a aussi réalisé des diodes p-i-n en CNT ainsi qu'étudié leur performance en mélangeur haute-fréquence jusqu'à 50GHz.

Harvard University, groupe de **Charles Lieber** (non-visité). Ce groupe travaille sur l'interface entre nanoscience et biologie, sur la nanoélectronique et la nanophotonique. En ce qui concerne la nano-électronique, le groupe a été très actif sur les nanotubes jusqu'en 2000, puis s'est depuis concentré sur la croissance et le transport cohérent dans les nano-fils de semi-conducteurs du groupe IV (Si/Ge), III-V (InAs/InP). Le groupe maîtrise la croissance d'hétérostructures en nano-fils dans la direction radiale ou axiale. Un aspect composant est développé pour réaliser des transistors logiques ou des mémoires MRAM.

Harvard University, groupe de **Amir Yacoby** (non-visité). L'activité du groupe est purement fondamentale et concerne la physique mésoscopique à très basse température. Récemment, il a étudié la polarisation nucléaire dynamique de spin électronique pour des électrons uniques dans des boîtes quantiques. A. Yacobi est aussi au Weizmann Institute où il a développé une technique de champ proche à très basse température où un transistor à un électron peut sonder la distribution électronique. Il a ainsi caractérisé le désordre de fluctuations de densité dans le graphène.

Harvard University, groupe de **Charles M. Marcus** (visité). Avant de s'établir à Harvard, C. Marcus était basé à Stanford où il a étudié les problèmes de transport dans des billards électroniques, c'est à dire des cavités dans lesquelles le mouvement des électrons aurait un mouvement chaotique s'il était décrit d'après les lois classiques déterministes. La connaissance des phénomènes de cohérence à très basses températures dans des systèmes d'électrons 2D très purs réalisés dans des hétérojonctions de semi-conducteurs III-V lui a permis d'aborder ensuite à Harvard un programme très ambitieux de la manipulation du spin d'électrons dans une double boîte quantique. Le but est de réaliser des opérations de logique quantique à deux qubits. Ici le qubit est l'état de spin d'un électron. Le couplage entre l'état de spin et l'état de charge dans la boîte et l'utilisation d'électromètre basé sur la variation de conductance d'un contact ponctuel permet une mesure du résultat. Ce sujet est traité dans le volet information quantique.

Toujours en information quantique, un sujet plus ambitieux encore est celui concernant l'état à facteur de remplissage $5/2$ de l'effet Hall Quantique en fort champ magnétique perpendiculaire. A ultra-basse température (<0.2 Kelvin) et dans des hétérojonctions de mobilité record, réalisées par épitaxie par L. Pfeiffer de Bell labs, un nouvel état quantique se forme dont les excitations au-dessus du niveau fondamental sont des quasiparticules de charge $e/4$. Plus étonnant, celles-ci devraient obéir à une statistique non-abélienne (la permutation de plusieurs particules donne une phase à la fonction d'onde globale obéissant une loi de composition non-commutative, généralisant la notion de Fermion ou Bosons). La manipulation des quasi-particules permettrait de réaliser des opérations unitaires de l'information quantique. Le caractère non-abélien fournirait aux qubits une protection topologique des effets de décohérence dus à l'environnement. En effet les fluctuations de champ électrique de l'environnement ne peuvent pas « détricoter » spontanément la phase codée par une série d'opérations non-commutatives. Le groupe de C. Marcus a récemment maîtrisé les briques de base expérimentales nécessaire à la démonstration, encore à venir, de la statistique non-abélienne.

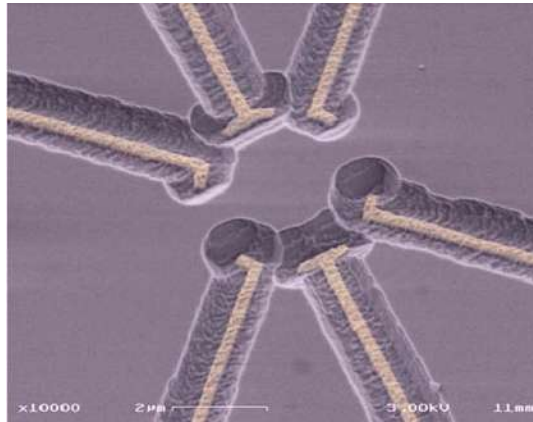


Figure 16 Micrographie électronique d'un dispositif utilisé par le groupe de Charles Marcus à Harvard pour étudier l'effet Hall quantique fractionnaire, et l'éventuelle statistique non abélienne qu'il pourrait exhiber. Crédits : Charles Marcus, Harvard, <http://marcuslab.harvard.edu/MarcusWebPageFQHE.pdf>

Parmi d'autres activités on doit citer celle sur l'effet Kondo des boîtes quantiques. L'effet Kondo remonte à l'étude d'une anomalie de la résistivité des métaux due à la présence d'impuretés magnétiques qui diffusent très efficacement les électrons à basse température. Une compréhension théorique a été fournie par le physicien japonais Kondo. Dans une boîte quantique un phénomène analogue se passe dans lequel le spin de l'électron occupant un niveau devient écranté par les électrons des contacts adjacents. Ceci favorise le passage simultané d'un deuxième électron et renforce la conduction. Ce phénomène mésoscopique est cependant très général. Le phénomène a été observé dans des nanotubes de carbone à des températures supérieures à celle de l'Hélium liquide. A plus haute température encore, cet effet peut affecter la conduction à travers des molécules bien couplées à des fils. Sa connaissance pour l'électronique moléculaire devient alors essentielle.

Le groupe de C. Marcus a aussi une activité sur des doubles boîtes quantiques couplées réalisées dans un même nanotube monoparoï grâce à des grilles définissant des régions de confinement électronique distinctes mais adjacentes.

Concernant la nanoélectronique quantique, directement pertinente dans le contexte post-CMOS, le groupe a réalisé des boîtes quantiques avec des nanofils en SiGe. Plus récemment il s'est intéressé au graphène avec des mesures du bruit de grenaille. Les résultats obtenus ne sont pas conformes à un modèle de transport balistique mais montrent l'influence prépondérante du désordre provenant du substrat (SiO₂).

MIT, Center for Materials Science and Engineering (CMSE), groupe de Mounji Bawendi (non-visité). Ce groupe étudie les propriétés électroniques de semi-conducteurs mésoscopiques et structures magnétiques. Les études portent sur des nanocristaux auto-assemblés dans le but de réaliser des dispositifs à un électron à température ambiante. Des études sur la photodétection de ces dispositifs ont été aussi réalisées. Dans ce groupe, Ray Ashoori étudie la physique mésoscopique d'électrons 2D dans le régime d'effet Hall quantique à très basse température avec la mise point d'une technique de champ proche à basse température permettant la spectroscopie locale par mesure de capacitance. On peut ainsi faire l'image spatiale de la densité d'états électroniques. Plus récemment il a développé une technique de mesure de capacitance dans le domaine temporel permettant de faire de la spectroscopie d'états à haute résolution.

Le groupe de *Columbia University (New York), Columbia Nanocenter (visité)* a une forte activité concernant en particulier graphène, nanotube de carbone et électronique moléculaire. Cette activité est décrite dans la partie Électronique Moléculaire.

Yale University (New Haven), département de Physique appliquée. Ce département a une activité en physique mésoscopique importante. Cette activité est concentrée d'une part sur les qubits supraconducteurs à très basse température.

Ceci concerne le groupe de **Robert Schoelkopf** (visité) et celui de **Michel Dévoret** (visité). Ces deux activités sont traitées dans le volet consacré à l'Information Quantique.

Le groupe de **Dan Prober** (non-visité) a lui une longue tradition en physique mésoscopique mélangeant les aspects appliqués (détecteurs de rayonnement millimétrique pour la radioastronomie, nanotubes à haute fréquence) et très fondamentaux. Le groupe est connu pour avoir significativement contribué à la compréhension du bruit de grenaille quantique en haute fréquence dans des conducteurs quantiques ainsi qu'à l'exploration des moments d'ordres supérieurs du bruit en courant. Pour les aspects appliqués, le groupe étudie des détecteurs basés sur des jonctions SIS ou des bolomètres exploitant la transition normal-supraconducteur et visent le domaine du rayonnement millimétrique. Plus récemment la réponse bolométrique d'un nanotube et la mesure de son impédance cinétique dans le domaine THz à été abordée.

IBM Watson research center (Yorktown, NY). Bien qu'IBM Yorktown ait été le centre qui a donné naissance à la physique mésoscopique, il n'y a plus d'activité liée directement à cette thématique excepté celle sur l'information quantique à dominante théorique. La nanoélectronique quantique est représentée par l'activité sur les nanotubes de carbone, du groupe de Phaedon Avouris. Yu-Ming Li a présenté cette activité qui est déjà décrite dans le chapitre électronique moléculaire.

6.2.2. Cote Ouest

Stanford University, groupe de **Hongjie Dai**, professeur au département de Chimie et Laboratoire des Matériaux avancés (non visité). Ce groupe a très tôt développé la croissance CVD (chemical vapor Deposition) de nanotube de carbone par procédé catalytique. Cette méthode est maintenant couramment utilisée dans la plupart des laboratoires car elle donne des nanotubes de très bonne qualité. Le groupe a observé des interférences électroniques mésoscopiques comme l'effet Aharonov Bohm, ou de type Fabry-Pérot, dans des nanotubes très purs à basse température. La technique de nanotubes suspendus a permis de comparer le transport thermique avec ou sans substrat et d'étudier des effets électromécaniques. Concernant l'aspect composants, une activité importante a été consacrée à l'obtention de CNT-FET de forte transconductance grâce à des matériaux à fort diélectrique obtenu par méthode de déposition en couche atomique (ALD).

L'activité CVD s'est tournée vers la croissance de nanofils de Ge avec démonstration de nano-FET Ge avec des diélectriques de fort K.

Stanford University, groupe de **Yoshihisa Yamamoto** du département de physique (non-visité). Le 'Quantum Information Group' a une petite activité en physique mésoscopique tandis que l'essentiel de leur effort porte sur l'optique quantique. Nous pouvons citer un travail récent sur les bruit de grenaille des nanotubes dans le régime non-linéaire dit de 'liquide de Luttinger', et un travail plus ancien sur le bruit quantique dans des conducteurs balistiques à base d'hétérojonctions AsGa .

Stanford University, groupe de **Goldhaber Gordon** du département de physique (non-visité). Ce groupe étudie le transport dans des hétérostructures GaN/GaAlN, l'effet Kondo de boîtes quantiques, les semi-conducteurs magnétiques, le transport dans le graphène. Une technique de champ proche, appelée 'scanning gate microscopy', permet d'imager les lignes de courant issues de contacts ponctuels dans des conducteurs balistiques.

Stanford University, groupe de **Philip Wong** du Department of Electrical Engineering (visité). Philip Wong a présenté les activités du Département. Il n'y a pas de physique du transport quantique à proprement parler mais de nombreux développements sur des circuits à base de nanotubes et de nano-fils et leur intégration.

IBM Almaden Research Center. Il n'y a pas de recherche fondamentale en transport électronique quantique excepté celle très fondamentale du laboratoire de Don Eigler que nous avons visité. Ce laboratoire étudie les ondes stationnaires électroniques qui se produisent à la surface d'un métal quand on place des impuretés en surface. La surface est du cuivre, les atomes manipulés par une pointe STM et arrangés sur la surface sont des atomes de cobalt. L'imagerie de densité d'état électronique se fait par microscopie tunnel à balayage (STM). La réalisation de 'quantum corals' ou de mirage quantique dû à l'effet Kondo d'une impureté magnétique est très spectaculaire. Cette activité reste cependant marginale et est plutôt à considérer comme une 'vitrine' pour IBM.

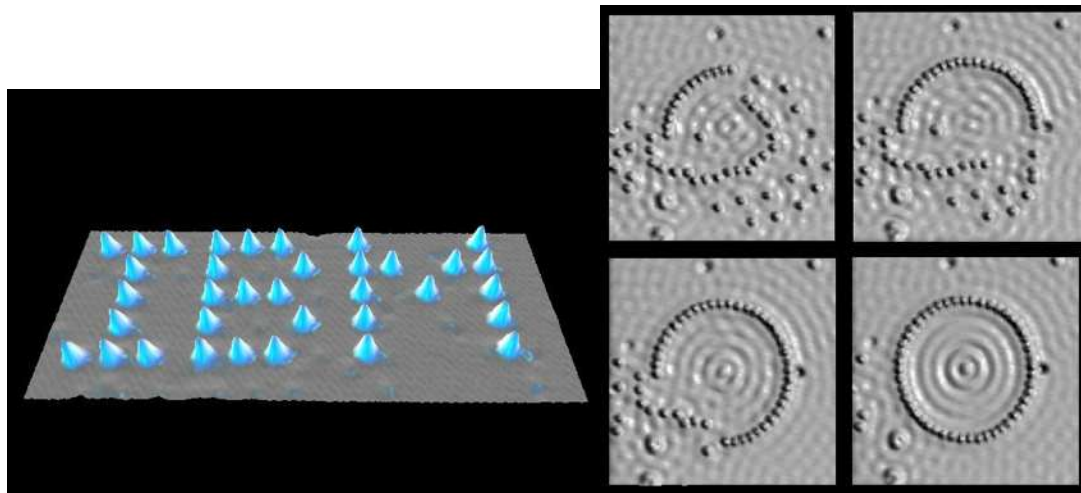


Figure 17 Structures bidimensionnelles créées par le groupe de Don Eigler à IBM Almaden, en déplaçant individuellement des atomes en surface à l'aide d'une pointe STM. À droite le 'quantum coral' permet de visualiser les ondes stationnaires électroniques résonantes à l'intérieur du cercle. Crédits : Don Eigler, IBM Almaden.

6.3. Conclusion

La physique mésoscopique concerne, soit des groupes étudiant les aspects fondamentaux du transport électronique, soit des groupes utilisant des conducteurs avec un fort potentiel pour exploiter des effets quantiques à température ambiante comme les nanotubes de carbone, le graphène ou des molécules, on parle alors de Nanoélectronique quantique. Les concepts testés par les premiers sur des systèmes simples loin des applications, sont utilisables directement par les seconds. Parmi les matériaux très prometteurs pour une électronique post-CMOS, le graphène et les nanotubes de carbone sont les matériaux de choix. L'étude fine du transport électronique quantique montre qu'on peut améliorer encore leur performance d'un ordre de grandeur et table sur des effets quantiques dominant à température ambiante.

7. INFORMATION QUANTIQUE

Parmi les différentes voies explorées dans le but de toujours augmenter la puissance de traitement des informations, le *traitement quantique de l'information* est aussi présenté comme une alternative à l'électronique conventionnelle basée sur la logique C-MOS. Mais c'est une alternative tout à fait à part à plusieurs titres :

Premièrement, le gain de puissance escompté a une source radicalement différente : il ne provient pas d'une miniaturisation des composants de base, accompagnée d'une diminution de l'énergie dissipée par opération élémentaire («ultimate CMOS » et électronique moléculaire), d'une meilleure intégration de ces composants dans de nouvelles architectures, ou de l'introduction de nouvelles fonctions ou de mémoire rapides non-volatiles (spintronique). Le gain de puissance doit venir d'une nouvelle algorithmie, une *algorithmie quantique*, c'est à dire de méthodes de traitement tirant partie des lois de la physique quantique : ces lois confèrent en effet à un processeur quantique un caractère intrinsèquement parallèle, lui permettant par là d'«évaluer en une fois» une fonction pour toutes les valeurs possibles du registre d'entrée du processeur (voir section suivante).

Seconde particularité, le développement du traitement quantique de l'information reste aujourd'hui une activité de recherche fondamentale pure¹⁷, beaucoup plus en amont des applications technologiques que les autres voies évoquées dans ce rapport. Ce caractère très amont conduit même certains à douter de la crédibilité de ce domaine en tant qu'alternative à l'électronique actuelle, et plusieurs des hôtes visités durant cette mission se sont montrés ironiques sur le sujet.

Enfin, le futur support physique de l'information quantique n'est pas encore défini clairement : en effet, la jeunesse du domaine fait que les explorations expérimentales sont conduites tous azimuts, sur une grande variété de systèmes physiques, relevant de l'optique, de la physique atomique, de la chimie, ou de la physique mésoscopique à l'état solide (voir section suivante). Seuls les dispositifs à l'état solide, habituellement rattachés à l'électronique, ont fait l'objet de visites et de présentations lors de cette mission.

La section suivante est une introduction au traitement quantique de l'information, qui devrait permettre au lecteur non spécialiste de comprendre le compte-rendu des visites effectuées par la délégation. Ce compte-rendu ne suit pas l'ordre chronologique des visites, mais traite successivement des qubits dans le diamant, des boîtes quantiques réalisées dans des matériaux semi-conducteurs, et des bits quantiques supraconducteurs.

7.1. Introduction élémentaire au traitement quantique de l'information

L'information quantique et son traitement sont généralement structurés de la même manière qu'en informatique classique. De même que l'information classique se décompose habituellement en unités élémentaires, les bits, l'information quantique peut se décomposer en bits quantiques (ou qubits). Conceptuellement, les bits sont des systèmes à deux états accessibles (souvent codés 0 et 1) qui ne peuvent se trouver exclusivement que dans l'un ou l'autre de ces états ; les qubits sont quant à eux des systèmes à deux niveaux pouvant se trouver dans n'importe quelle superposition quantique $a|0\rangle + b|1\rangle$ des deux états de base notés généralement $|0\rangle$ et $|1\rangle$ par analogie (ici, a et b sont des coefficients complexes satisfaisant à la condition $|a|^2 + |b|^2 = 1$ où $|x|$ signifie module du nombre complexe x). La signification physique de cette superposition (le fait que le qubit soit à la fois dans

¹⁷ Une compagnie canadienne, Dwave, prétend cependant en être à un stade plus avancé et avoir fait la démonstration d'un processeur quantique capable de participer utilement à la résolution de problèmes mathématiquement difficiles. Cependant, le mode de communication choisi par cette compagnie est si éloigné des standards du monde scientifique qu'il rend impossible toute vérification de la part de la communauté.

les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ au sens du signe « + » de l'écriture $a|0\rangle + b|1\rangle$ n'est pas toujours facile à comprendre pour le non physicien. Elle s'éclaire lorsque l'on considère:

- ce qui se passe d'une part quand on applique au qubit une transformation U (une étape de calcul) et qu'on suit l'algèbre élémentaire de la mécanique quantique ;
- ce qui se passe d'autre part quand on mesure l'état final du qubit.

L'application de la fonction U à la superposition initiale $a|0\rangle + b|1\rangle$ par exemple (on choisit ici $a=b=1/\sqrt{2}$ par simplicité) superpose les résultats associés à chacun des états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ en donnant $U(a|0\rangle+b|1\rangle) = a U(|0\rangle) + b U(|1\rangle)$. Si l'opération U a pour effet de transformer l'état $|0\rangle$ en une superposition $U(|0\rangle) = c|0\rangle+d|1\rangle$ et l'état $|1\rangle$ en $U(|1\rangle) = c'|0\rangle + d'|1\rangle$, elle conduit le qubit dans la superposition finale $a(c+c')|0\rangle + b(d+d')|1\rangle$.

Lors d'une mesure, le qubit se retrouve projeté soit dans l'état $|0\rangle$, soit dans l'état $|1\rangle$ (et jamais les deux à la fois), un peu comme un bit classique ; mais les lois de la physique quantique sont telles que les probabilités associées à ces deux éventualités sont respectivement $p_0 = |c+c'|^2 / 2$ et $p_1=1- p_0 = |d+d'|^2 / 2$. L'important est que ces probabilités résultent d'une combinaison (signes « + » dans $c+c'$ et $d+d'$) des sous résultats $U(|0\rangle)$ et $U(|1\rangle)$ qui sont évalués simultanément. Ce parallélisme (simultanéité des évaluations) et ces combinaisons (connues sous le nom d'interférences) sont intrinsèques à la physique quantique et confère sa puissance au traitement quantique de l'information. Cette puissance n'apparaît d'ailleurs vraiment que lorsqu'on considère un registre de plusieurs qubits (disons au nombre de n) : en effet un tel registre admet 2^n états de base et chaque étape de calcul (chaque fonction U) évalue simultanément et superpose (en faisant donc interférer) les 2^n sous résultats correspondants. Ce principe du traitement quantique de l'information suppose évidemment l'existence d'algorithmes quantiques (succession d'opérations U) encodant le résultat d'un calcul utile dans la probabilité finale de mesurer l'un (ou plusieurs) des qubits du registre dans l'état $|0\rangle$ ou $|1\rangle$.

Ce sont précisément de tels algorithmes qui ont été inventés dans les années 1990, comme celui de Shor qui permet de factoriser un nombre en ses facteurs premiers, ou celui de Grover qui permet de trouver un élément dans une liste non triée. Il est démontré que ces algorithmes sont supérieurs à leurs homologues classiques en terme de ressources (nombre de bits et nombre de portes logiques) nécessaires à la résolution du problème traité, et que cette supériorité peut croître, suivant les cas, de manière exponentielle ou polynomiale avec la taille du problème à résoudre (la taille est en fait le nombre de bits nécessaire à la représentation des données du calcul). Il y donc bien des problèmes mathématiques pour lesquels, au delà d'une certaine taille des données à traiter, un processeur quantique serait plus rapide que n'importe quel processeur classique, en principe en tout cas.

La situation n'est pas si simple dans le monde réel, où les superpositions cohérentes d'états d'un système composé d'un grand nombre d'objets élémentaires interagissant entre eux et avec le monde extérieur (comme les n qubits du registre évoqués plus haut) ont tendance à s'évanouir. Autrement dit, le registre cesse progressivement d'être dans une superposition de plusieurs états de base à la fois, et se retrouve finalement seulement dans l'un des états, avec certaines probabilités : Le parallélisme des calculs et les interférences sont donc perdus. Le processeur quantique fait au mieux des erreurs, et au pire cesse de fonctionner avant la fin du calcul.

Cette perte par le système de ses propriétés spécifiquement quantiques, phénomène connu sous le nom de *décohérence*, se calcule d'ailleurs théoriquement par les lois même de la physique quantique, depuis les années 1980. La décohérence peut être vue comme résultant de plusieurs types d'interaction entre les qubits et leur environnement : la *relaxation* correspond à un transfert d'énergie de l'un des qubits initialement dans l'état $|1\rangle$ vers un degré de liberté du voisinage, le qubit se retrouvant alors dans l'état final $|0\rangle$; l'*excitation* correspond à l'interaction inverse où

l'environnement donne de l'énergie à un qubit initialement dans l'état $|0\rangle$; enfin le *déphasage pur*, qui correspond à l'interaction sans échange d'énergie d'un qubit avec le reste du processeur quantique, détruit les superpositions du type $a|0\rangle + b|1\rangle$ introduites plus haut en brouillant progressivement sa phase, c'est à dire les arguments des nombres complexes a et b . On caractérise chacun de ces processus probabilistes par un temps caractéristique indiquant la durée moyenne pour qu'il se soit produit ou ait eu un certain effet. La décohérence est caractérisée quant à elle de manière globale par le *temps de cohérence*, temps moyen au bout duquel la capacité du qubit ou du registre à produire les interférences introduites plus haut a diminué de 2/3 en moyenne. Pour résumer, disons que la décohérence est un obstacle énorme à la réalisation d'un processeur quantique, même s'il a été démontré qu'une décohérence suffisamment faible peut être corrigée par des codes correcteurs d'erreurs basés sur une introduction volontaire de redondance dans l'information quantique.

A ce niveau de la discussion, il convient de distinguer deux principes assez différents de processeurs quantiques, pour lesquels relaxation, excitation et déphasage interviennent de manières différentes. Dans le schéma le plus répandu, appelé ici processeur quantique conventionnel, le calcul avance en une succession d'étapes consistant à exciter ponctuellement certains qubits (portes logiques à un qubit), à « brancher » et « débrancher » sur une durée bien déterminée des couplages entre deux qubits de façon à produire des portes logiques à deux qubits (analogues des portes NAND ou XOR en traitement classique de l'information), et enfin à mesurer un ou plusieurs qubits. Dans ce schéma, déphasage et relaxation sont un problème alors que l'excitation est facilement évitée en refroidissant le processeur à une température T telle que l'énergie thermique $k_B T$ soit bien inférieure à l'énergie des qubits.

Dans un schéma plus récent et beaucoup moins répandu, dit du processeur quantique adiabatique, aucun qubit n'est jamais excité. Le calcul se déroule par un changement continu et lent des énergies potentielles associées à chaque qubit et des énergies de couplage entre qubits voisins ; certains qubits sont mesurés dans une base prédéterminée à la fin de cette évolution adiabatique qui doit maintenir à tout instant l'intégralité du processeur dans son état quantique fondamental. La relaxation n'est donc pas un problème. Par contre, sur le chemin de l'évolution adiabatique, se présentent des points de passage où les niveaux d'énergie excités sont si proches de l'état fondamental que l'excitation est un problème. En ces points, le rôle du déphasage est encore mal compris. Ce schéma du processeur quantique adiabatique, encore débattu aujourd'hui par les spécialistes, est celui développé par la compagnie canadienne D-wave. La présente mission aux USA n'a pas rencontré d'acteurs impliqués dans cette recherche, et nous n'en parlons plus dans la suite.

Au niveau expérimental, faire la démonstration d'un processeur quantique élémentaire passe par une succession d'étapes assez simples à définir : il faut d'abord choisir un système physique à deux niveaux réalisant un qubit, choisir une méthode de pilotage de l'état quantique de ce qubit, et une méthode de lecture de son état. Il faut ensuite caractériser la fidélité de la préparation dans un état de superposition arbitraire, c'est-à-dire la fidélité des portes logiques à un qubit. On caractérise ensuite la sensibilité, la fidélité, et le caractère éventuellement non destructif (QND) de la méthode de lecture. En ce qui concerne la sensibilité, on distingue la *lecture en un coup* (single shot) qui discrimine les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ en une seule mesure quantique, de la lecture moyennée qui nécessite de re-préparer dans le même état et de re-mesurer le qubit plusieurs fois pour sortir le signal de mesure du bruit. La fidélité de la mesure est quant à elle l'inverse du taux d'erreur de lecture. Le caractère QND correspond à la capacité de remesurer plusieurs fois l'état $|0\rangle$ (ou $|1\rangle$) d'un qubit projeté une première fois sur $|0\rangle$ (ou $|1\rangle$), sans re-préparation entre les mesures. On caractérise ensuite la relaxation, l'excitation et le déphasage pur du qubit par spectroscopie et par des protocoles inspirés de ceux développés en physique atomique et en résonance magnétique nucléaire (RMN). Il est notamment possible d'utiliser des techniques dites « d'écho de spin » éliminant l'influence des sources de décohérence les plus lentes et conduisant à un temps de cohérence mesuré plus long et plus intrinsèque. Il convient ensuite de caractériser les systèmes à deux qubits (ou plus), par spectroscopie

du système couplé d'abord, puis en réalisant une porte quantique à deux qubits caractérisée au final par mesure de sa fidélité par tomographie quantique. On peut alors faire la démonstration d'algorithmes plus ou moins élémentaires.

Les systèmes à deux niveaux choisis pour réaliser des qubits se divisent en deux classes. On trouve tout d'abord des objets microscopiques découplés du reste du monde ; ils sont naturellement quantiques et présentent des temps de cohérence longs : ce sont les photons, les atomes de Rydberg ou les ions piégés dans le vide, les spins nucléaires de molécules organiques manipulés par RMN, etc. Il est traditionnellement dit que ces systèmes microscopiques sont par nature difficilement intégrables à grande échelle. Mais ils bénéficient de près de 50 ans de technologie quantique ayant conduit aux horloges atomiques actuelles, et ils sont bien sûr les plus avancés dans la démonstration de processeurs quantiques élémentaires. Les ions dans des pièges électromagnétiques quadripolaires ont déjà fait la démonstration de portes logiques à deux et trois qubits caractérisées par tomographie quantique, et la démonstration de petits algorithmes impliquant 5-8 qubits, dont des codes simples de correction d'erreur. Mais la démonstration la plus impressionnante reste celle de I. Chuang et de ses collègues (MIT – IBM 2001) qui ont factorisé le nombre 15 par l'algorithme de Shor, en utilisant un petit volume de liquide contenant un nombre macroscopique de molécules organiques identiques à 7 spins nucléaires, dans un spectromètre de RMN.

La seconde classe de qubits est celle des objets plus macroscopiques, à l'état solide ; ces derniers sont moins isolés et leur cohérence est beaucoup plus difficile à préserver. Ils sont plus proches de l'électronique conventionnelle, et sont traditionnellement considérés comme facilement intégrables bien qu'il n'ait pas encore été prouvé expérimentalement que la cohérence survive à l'intégration. On trouve parmi ces qubits les spins électroniques des centres NV du diamant et les spins nucléaires d'atomes en substitution dans des cristaux sans spin. Ils sont en général lus et en partie manipulés par des méthodes optiques et sont plus proches de l'optique quantique que de l'électronique proprement dite. La mission a rencontré deux acteurs de ce domaine. Puis viennent les vrais systèmes électroniques, fabriqués par les techniques de micro et de nanoélectroniques, et où les qubits sont manipulés et lus par des méthodes électriques. Ces qubits peuvent être :

- les états électroniques quantiques de boîtes quantiques semi-conductrices, réalisées dans un gaz bidimensionnel d'électrons où le long d'un nanotube (et peut être dans un futur proche, dans du graphène).
- les états quantiques macroscopiques d'un composant supraconducteur à jonctions Josephson.

La délégation a rencontré des chercheurs dans les deux derniers domaines.

7.2. Les qubits dans le diamant

7.2.1. Introduction aux défauts du diamant utilisés comme qubits

Le diamant contient des défauts appelés centres NV, correspondant à l'association d'une lacune et d'un atome d'azote en substitution d'un atome de carbone (voir figure 18). Les monocristaux de haute qualité ont une densité de centres NV si faible que ces défauts sont isolés les uns des autres. Il arrive même qu'un monocristal de diamant ne contienne qu'un seul centre NV. Dans son état chargé négativement, ce défaut a un spectre d'énergie caractérisé par un triplet de niveaux à basse énergie : l'état fondamental ($m_s = 0$) est séparé des deux autres niveaux ($m_s = \pm 1$, dégénérés à champ magnétique nul) par 2.88 GHz. En levant la dégénérescence des deux niveaux du haut par un faible champ magnétique, les deux niveaux les plus bas définissent un qubit manipulable par irradiation micro-onde. Beaucoup plus haut en énergie, le spectre contient des niveaux optiques qui permettent de lire l'état du qubit par une excitation sélective de l'état fondamental, suivie d'une fluorescence du centre NV lors de son retour vers ce fondamental. Les expériences utilisent donc

généralement un laser focalisé sur le défaut à l'aide d'un microscope optique confocal, qui collecte également le signal de fluorescence. Le pompage optique permet également de réinitialiser le qubit dans son état fondamental.

Par ailleurs le diamant contient naturellement 1% d'atomes de carbone ^{13}C , de spin nucléaire $1/2$. Ces spins sont couplés par interaction hyperfine au niveau excité du qubit NV, et ce d'autant plus qu'ils en sont plus proches. Ils constituent donc une source de bruit limitant la cohérence du qubit NV. Mais quand ce bruit est compensé par une technique d'écho de spins, le temps de cohérence du qubit NV atteint cependant plusieurs centaines de microsecondes à température ambiante. C'est ce très bon temps de cohérence intrinsèque pour un qubit à l'état solide qui rend le centre NV très intéressant.

Enfin les atomes de carbone ^{13}C tout proche d'un qubit NV peuvent être vus, non plus comme une source de décohérence, mais comme d'autres qubits couplés au premier. Le qubit NV permet alors de les polariser, de les coupler, et de les lire.

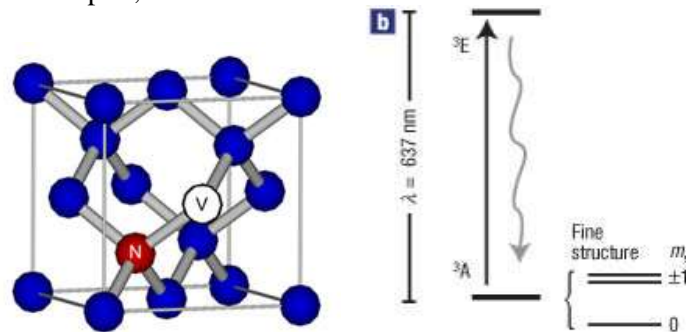


Figure 18 Structure de la maille atomique d'un centre NV dans le diamant, et schéma montrant les différents niveaux d'énergie du défaut.

7.2.2. Groupe de recherche de M.D. Lukin à l'Université de Harvard

M. Lukin a d'abord présenté oralement à la délégation ses recherches en physique mésoscopique et sur le traitement quantique de l'information dans le diamant. Bien que théoricien en physique du solide, il anime avec succès une groupe de recherche expérimentale (voir <http://lukin.physics.harvard.edu/>). Le groupe a démontré en 2007 une grande maîtrise d'un qubit NV couplé à des qubits de carbone ^{13}C à température ambiante (M.V. Gurudev Dutt *et al*, Science **316**, p.1312, 2007). Le spin nucléaire d'un qubit ^{13}C peut être polarisé (initialisé) avec une fidélité de 85 % à l'aide du qubit NV ; une superposition quelconque des états du qubit NV peut être copiée sur un qubit ^{13}C , y être stockée, puis relue avec une fidélité de 75% ; Le couplage cohérent entre deux ^{13}C a été observé pendant 0.5 ms, et le temps de cohérence d'un qubit ^{13}C (mesuré par une méthode d'écho de spin) dépasse 20 ms. Enfin le qubit ^{13}C décohère en environ $1 \mu\text{s}$ lorsque le système est irradié par le laser de pompage optique du centre NV.

La délégation a ensuite visité brièvement le laboratoire. Il en ressort que les méthodes utilisées par le groupe pour l'étude des qubits dans le diamant sont celles de l'optique quantique et ont peu à voir avec l'électronique.

7.2.3. Laboratoire « Quantum Science Research » de Hewlett-Packard, Palo Alto, CA

Le laboratoire « Quantum Science Research » de Hewlett Packard (<http://www.hpl.hp.com/research/qsr/>) mène des recherches très diverses, qui n'ont pas toutes pour objet la physique quantique. Il est cependant très actif sur les sources quantiques de photons uniques et les centres NV du diamant. Le premier sujet n'a pas été présenté à la délégation, car il avait fait l'objet d'une présentation lors d'une précédente mission. C. Santori a par contre présenté en détails le

travail du laboratoire sur le diamant. Le groupe a récemment démontré que l'excitation sélective d'un qubit NV de son état fondamental à l'un des états $m_s = +1$ ou $m_s = -1$ pouvait se faire en orientant précisément les axes cristallographiques du grain de diamant par rapport à la direction de propagation des micro-ondes, et en polarisant cette onde circulairement droite ou gauche. Cette méthode, qui tire partie des règles de sélection des transitions atomiques ouvre la voie à la manipulation des qubits NV à champ magnétique nul. Elle débouche également sur une méthode originale d'imagerie des centres NV (voir figure 19) qui encode leur direction cristallographique (il y en quatre possibles) par une couleur (Phys. Rev. B **76**, p. 165205, 2007).

Le groupe de chercheurs a également effectué sur un centre NV, dans un cristal maintenu à une température de 8 K, une expérience connue en physique atomique sous le nom de « coherent population trapping » (Phys. Rev. Lett. **97**, p. 247401, 2006). Il s'agit d'irradier le qubit NV à la fréquence de pompage optique modulée par une fréquence proche de celle du qubit. La raie optique principale peut alors stimuler l'une des transitions optiques à partir du (et vers le) niveau fondamental du qubit alors que l'une des bandes latérales stimule la transition à partir de son niveau excité ($m_s = +/-1$). Les transitions sont cohérentes et interfèrent. L'application d'un champ magnétique levant la dégénérescence des niveaux $m_s = +/-1$ permet alors en principe de préparer une superposition cohérente arbitraire des états du qubit NV.

Enfin, le groupe développe des cavités optiques circulaires de fort facteur de qualité (voir figure 19), destinées à coupler optiquement des qubits NV situés dans des cristaux de diamant différents, déposés à la surface de la cavité (Proc. SPIE **6903**, p. 69030M, 2008). Il est à noter que les expériences mentionnées ci-dessus sont toutes de type spectroscopique, et qu'aucune manipulation cohérente de qubit NV dans le domaine temporel n'a été présentée.

La délégation a également visité la salle d'expériences, véritable laboratoire d'optique quantique, équipé de nombreux bancs optiques. Les chercheurs ont notamment construit un micromanipulateur cryogénique de fibre optique permettant d'illuminer précisément un microcristal ou une cavité optique.

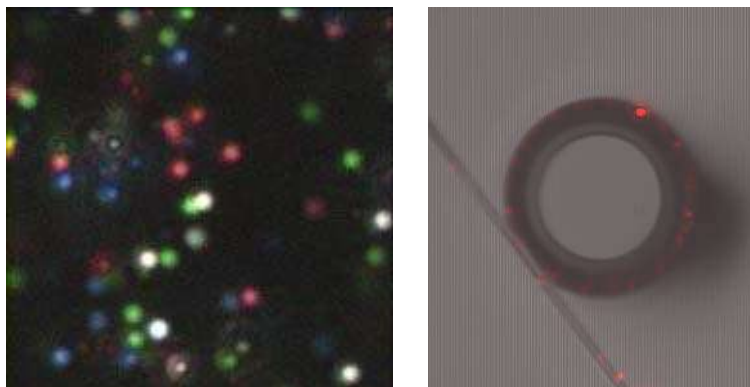


Figure 19 Recherches du groupe QSR de HP sur les centres NV du diamant. Gauche : Imagerie de l'orientation cristallographique des centres NV. Droite : couplage de centres NV par un microrésonateur optique. Crédits : Stanley Williams, Hewlett Packard.

7.3. Les qubits dans des boîtes quantiques semi-conductrices

7.3.1. Introduction aux qubits de spin électronique dans les boîtes quantiques

Utiliser comme qubit un unique spin électronique piégé et manipulé dans un semi-conducteur à l'aide de simples électrodes de grille est une proposition de D. DiVincenzo remontant à 1999. La motivation principale en est que le degré de liberté de spin d'un électron n'est essentiellement couplé qu'au champ magnétique et aux autres spins via l'interaction hyperfine (l'interaction spin-orbite est très faible). Les temps de cohérence estimés sont donc de plusieurs millisecondes dans une matrice cristalline sans spin. Le matériau utilisé pour piéger les spins est généralement un gaz bidimensionnel d'électrons réalisé dans une hétéro-structure GaAs/GaAlAs, à une centaine de nm sous la surface de la puce. La qualité de ce matériau est telle que les électrons peuvent s'y propager de manière balistique sur des longueurs de plusieurs dizaines de microns ! Par ailleurs, de simples électrodes de grille déposées à la surface de la puce permettent de « dépléter » le gaz d'électrons sous l'électrode, plus ou moins selon la tension appliquée, afin de définir précisément la géométrie des circuits. On peut donc facilement délimiter des zones conductrices faiblement couplées entre elles par effet tunnel à travers une mince « barrière déplétée ». Quand la zone conductrice est fermée et de petites dimensions, elle constitue un îlot appelé boîte quantique, pouvant piéger des électrons. Il est même possible de dépléter cette boîte jusqu'à ce qu'elle ne contienne qu'un dernier électron de conduction. Cet électron dans sa boîte constitue alors un atome artificiel dont deux états présentant des orientations différentes du spin peuvent servir à définir un qubit.

Des schémas légèrement différents existent, où le qubit de spin est constitué d'une boîte quantique à plus d'un électron, ou de deux boîtes quantiques couplées de manière réglable par effet tunnel et contenant plus d'un électron (voir section suivante). La manipulation de l'état quantique s'effectue à l'aide des grilles, soit par une tension alternative résonante avec l'énergie de transition du qubit, soit par des rampes de tension déformant le spectre d'énergie des électrons dans leurs boîtes quantiques. La lecture de l'état d'un spin s'effectue généralement par un mécanisme de conversion spin-charge, c'est-à-dire en transférant ou non un électron d'une boîte à une autre électrode, suivant l'orientation de son spin (physique du blocage de spin). Cette charge transférée est alors mesurée par électrométrie.

7.3.2. Groupe de recherche de C. Markus à l'Université de Harvard, Cambridge, MA

Notre délégation a été accueillie par le Professeur C. Marcus, qui nous a présenté les travaux de son groupe de recherche, très productif en physique mésoscopique (voir <http://marcuslab.harvard.edu/>). L'un de ses programmes de recherche porte sur les qubits de spin électronique dans les semi-conducteurs. Le groupe a notamment fait la démonstration en 2005 de la manipulation cohérente de deux spins couplés dans une double boîte quantique (J.R. Petta *et al.*, Science **309**, p. 2180, 2005). Le qubit est ici constitué des deux électrons et a pour niveaux d'énergie les états correspondant aux deux spins antiparallèles dans la même boîte et aux deux spins antiparallèles chacun dans une boîte.

A l'aide de rampes adiabatiques de tension de grille (temps de montée de 1 ns) et d'un électromètre basé sur un contact ponctuel quantique couplé à l'une des boîtes (temps de mesure de 10 μ s), les chercheurs ont mesuré un temps de cohérence de la superposition des états du qubit environ égal à 10 ns. Cette valeur s'explique par le couplage parasite des spins du qubit à environ un million de spins nucléaires de l'AsGa. En utilisant une technique d'écho de spin bien connue en résonance magnétique nucléaire (RMN), le bruit associé à ces spins nucléaires a pu être compensé et le temps de cohérence allongé au-delà de la microseconde.

Depuis cette expérience, le groupe a travaillé au développement d'une version beaucoup plus rapide de son dispositif de lecture du qubit, le contact ponctuel quantique radiofréquence (D. J. Reilly

et al, Appl. Phys. Lett. **91**, p. 162101, 2007) ; il travaille également à la polarisation des spins nucléaires de l'AsGa par pilotage du qubit de spin (R. Petta *et al*, [arXiv:0709.0920](https://arxiv.org/abs/0709.0920), 2007), et à la transposition de son expérience dans des semi-conducteurs sans spins nucléaires : nanofils de silicium-germanium (Yongjie Hu *et al*, Nature Nanotechnology **2**, p. 622, 2007) et nanotubes de carbone. Notons en passant que la réalisation de boîte quantique dans des nanotubes pour le traitement quantique de l'information est un sujet de recherche que P. Kim nous a rapidement mentionné lors de notre visite de l'université de Colombia.

Notre délégation a également visité le laboratoire où sont effectuées les expériences de C. Marcus: ce laboratoire qui abrite trois ou quatre réfrigérateurs à dilution est exemplaire tant au niveau de son aménagement que de la qualité du matériel utilisé. Nous avons aussi vu la nouvelle salle blanche en cours d'installation (destinée à la fabrication des échantillons), et visité un atelier destiné à leur observation et à leur caractérisation (microscopie électronique à balayage et à transmission, microscopie à faisceau d'ions, diffractométrie X...), ainsi qu'à certaines étapes de fabrication comme la gravure par faisceau d'ions (FIB). La qualité technique des installations visitées, ainsi que la disponibilité d'un personnel technique important, comportant un spécialiste de chaque machine pouvant accueillir et former les chercheurs et les étudiants afin que ceux-ci puissent ensuite accéder directement aux équipements, sont très certainement des facteurs importants du succès de l'université d'Harvard en recherche académique.

Enfin, notons l'existence d'un institut virtuel d'information quantique, l' « Institute for Quantum Science and Engineering » qui regroupe moins d'une dizaine de professeurs comme C. Marcus ou M. Lukin, et qui dispose de fonds pour financer une recherche ne faisant pas l'objet de programmes soumis à approbation par les grands organismes publics. Le collège de professeurs peut ainsi décider de recruter de manière très souple et très réactive un chercheur temporaire voulant démarrer une activité originale et prometteuse en traitement quantique de l'information.

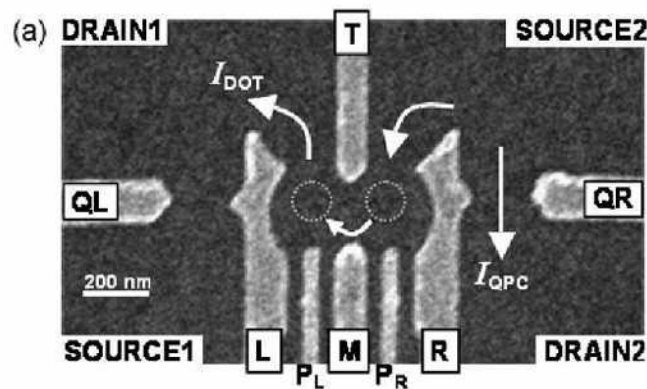


Figure 20 Micrographie électronique d'un bit quantique réalisé par le groupe de C. Marcus dans une hétérostructure AsGa/AlAsGa. Le qubit est formé de 2 spins électroniques confinés dans deux boîtes quantiques (cercles) définies par les électrodes de grille L, M, R et T. Les électrodes R et QR définissent un contact ponctuel quantique servant à lire l'état du qubit. Crédits : Charles Marcus, Harvard Université ¹⁸

¹⁸ Hans-Andreas Engel, L. P. Kouwenhoven, Daniel Loss, C. M. Marcus, 'Controlling Spin Qubits in Quantum Dots', Quantum Information Processing 3, 115 (2004)

7.4. Les qubits supraconducteurs

7.4.1. Introduction aux qubits Josephson

Ces bits quantiques sont des circuits à base de jonctions Josephson (JJ), c'est-à-dire de jonctions tunnels réalisées par une mince barrière isolante entre deux électrodes supraconductrices. Ils doivent être considérés comme globalement quantique : ils se comportent comme un atome artificiel dont le « spectre atomique » est anharmonique, et dont les deux niveaux d'énergie les plus bas définissent les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ du qubit. Ils sont aujourd'hui pilotés par des impulsions micro-ondes quasi-résonantes selon les principes de la RMN. Ils sont caractérisés par un ou deux degrés de liberté principaux associés à leur pilotage et/ou à leur lecture : ces degrés de liberté peuvent être une différence de phase supraconductrice aux bornes d'une JJ, une charge (c'est à dire un certain nombre de paires de Cooper) stockée sur un îlot supraconducteur limité par une (ou plusieurs) jonction(s), ou un flux (c'est-à-dire un certain nombre de quanta de flux $h/2e$) stocké dans une boucle supraconductrice.

On distingue trois familles de qubits Josephson, dérivées chacune d'un composant Josephson différent : Les qubits en phase dérivent de la JJ unique polarisée en courant, ou ce qui revient au même, en phase supraconductrice δ aux bornes de la jonction ; ils sont pilotés par des impulsions de courant (et donc de δ) et lus par un processus d'effet tunnel macroscopique de δ s'apparentant à la désintégration d'un atome radioactif. Les qubits en charge ou charge-phase dérivent d'un composant appelé *la boîte à paire de Cooper* ; ils sont pilotés par des impulsions micro-ondes de tension de grille (et donc en charge) et lus soit en utilisant la même variable, soit en utilisant une seconde variable de phase. Enfin, les qubits en flux dérivent de la boîte à fluxons connue en magnétométrie sous le nom de SQUID radiofréquence ; ils sont pilotés par des impulsions de courant (donc en flux ou en phase) et lus via la même variable, par l'intermédiaire d'un courant persistant couplé directement ou par inductance mutuelle à un SQUID de mesure.

Le laboratoire le plus en pointe dans le monde sur les qubits en phase est celui de J. Martinis, à l'université de Santa Barbara. Nous ne l'avons pas visité durant cette mission. Cependant nous avons visité la société Hypres, qui a par le passé fabriqué de tels qubits pour la recherche fondamentale, et qui propose par ailleurs une électronique supraconductrice (alternative au CMOS), qui ne repose pas sur un traitement quantique de l'information. Nous avons ensuite visité les groupes de recherche de R. Shoelkopf et M. Devoret à l'université de Yale, les plus en pointe au niveau mondial sur les qubits dérivés de la boîte à paire de Cooper. Enfin, nous avons visité le laboratoire de R. Koch (récemment décédé) à IBM Watson, impliqué dans le développement d'une architecture originale de qubits en flux.

7.4.2. La compagnie Hypres, Elmsford, NY

La compagnie Hypres est une « spin-off » d'IBM créée en 1983 pour développer une électronique entièrement supraconductrice (<http://www.hypres.com/>). Après avoir travaillé sur un oscilloscope ultra rapide, elle a fabriqué plusieurs systèmes de conservation du Volt pour les métrologistes : les étalons secondaires du Volt sont en effet basés sur des réseaux de jonctions Josephson (JJ) pilotés en micro-onde afin de produire une tension DC de précision métrologique. La compagnie s'est ensuite focalisée sur le développement de la seule technologie digitale supraconductrice, la *rapid single flux quantum logic* (RSFQ). Il est à noter que cette technologie, malgré son nom, n'est pas véritablement quantique au sens introduit plus haut : elle relève globalement des lois de la physique classique, comme la logique CMOS.

La brique de base de la technologie RSFQ est la JJ en parallèle avec une résistance. Le « 1 » de la logique RSFQ correspond à un quantum de flux $h/(2e)$ traversant la jonction, produisant ainsi à ses bornes une impulsion de tension calibrée se propageant jusqu'à la jonction suivante. La

technologie RSFQ est capable de reproduire toutes les fonctions de l'électronique digitale conventionnelle. Les fréquences d'horloge de systèmes simples ont été poussées au-delà de 100 GHz et l'énergie dissipée par porte est de l'ordre de l'atoJoule, soit 4 ordres de grandeur de moins qu'en électronique semi-conductrice (voir figure ci dessous).

Il faut cependant rajouter au bilan énergétique la puissance électrique nécessaire au maintien des puces à une température de 4K ; mais cette puissance n'est pas dissipée dans l'électronique elle-même, et dépend essentiellement du nombre de lignes électriques reliant les puces au connecteur extérieur placé à température ambiante. Hypres s'est engagé très tôt dans des collaborations avec des compagnies produisant des réfrigérateurs autonomes et compacts (à tube pulsé), n'ayant pas besoin d'être alimenté en fluide cryogénique (azote ou hélium liquide), et ne comportant pas de pièces mécaniques mobiles, ce qui est un gage de fiabilité. Elle est donc aujourd'hui en mesure de livrer des systèmes RSFQ complets atteignant leur température de fonctionnement en quelques heures, et fonctionnant ensuite en continu en ne tirant que 0.8 à 2.5kW de puissance, sur une unique prise électrique.

Pour ce qui est de la fabrication des puces RSFQ, Hypres est équipé en interne d'une ligne pilote autonome permettant de réaliser des prototypes de quelques dizaines de milliers de JJ, par dépôt (pulvérisation, évaporation, PECVD), gravure (RIE) et polissage mécano-chimique (CMP) d'un empilement de couches de Nb, d'oxyde d'aluminium, de Silice, et de couches résistives. La taille minimale des JJ est de l'ordre de $0.8\mu\text{m} \times 0.8\mu\text{m}$. Nos hôtes n'ont pas souhaité nous faire visiter ces installations et ont préféré nous montrer le laboratoire de test des systèmes complets.

Si Hypres développe ses propres produits et démonstrateurs, la ligne de fabrication est également ouverte à d'autres clients, qui peuvent fournir les dessins de n'importe quelle puce Josephson compatible avec la technologie Hypres, suivant une procédure décrite sur le site web de la compagnie. C'est par cette voie qu'Hypres a produit à partir de 2005 des qubits Josephson en phase pour des groupes de recherche américains (Université de Maryland) et européens (Université d'Erlangen). Ces qubits ont montré en laboratoire des oscillations de Rabi et des temps de cohérence de la dizaine de nanosecondes. Ces résultats, bien que dix fois moins bons que ceux obtenus sur des échantillons optimisés en laboratoire, ont impressionné la communauté scientifique et valident le concept de « fonderie Josephson » prestataire de service. Si la compagnie a par le passé utilisé la fabrication de puces quantiques comme axe de communication, notamment sur son site web, ce n'est plus le cas aujourd'hui. Nos hôtes, le Dr O. Mukhanov (vice président) et S. Kaplan (senior scientist) ne se sont pas montrés très intéressés par le sujet, malgré nos questions ; ils ont préférés nous faire une présentation très technique d'un système RSFQ de communication radiofréquence réalisé pour l'armée américaine.

Ce système appelé XADR est un récepteur numérique de signaux RF (dans la bande 7.25-7.75 GHz) qui permet de s'affranchir des composants RF analogiques (filtre - mixeur - oscillateur local) utilisés dans les systèmes de communication actuels pour séparer chaque sous-bande et démoduler les signaux correspondants. Un convertisseur analogique digital RSFQ numérise le signal dans toute la bande et le redécoupe en canaux à l'aide de translateurs de fréquence et de filtres I/Q numériques, également RSFQ. Le démonstrateur est cadencé à 10 GHz et délivre 40 M-échantillons par seconde (voir <http://www.hypres.com/pages/publication/ISEC07-IGORfinal.pdf>).

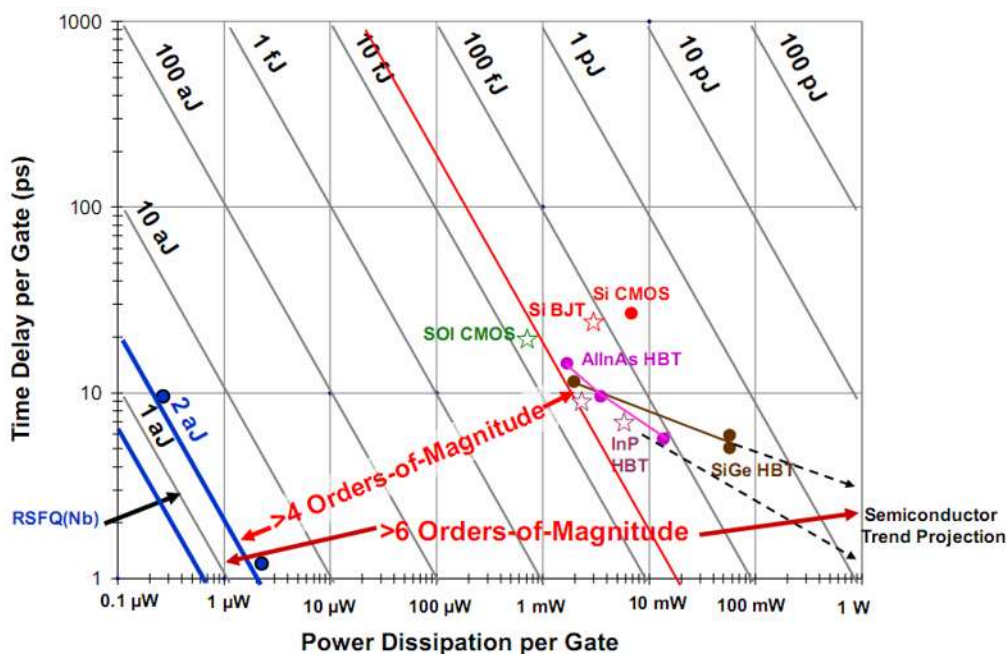


Figure 21 Graphique montrant les fortes différences en termes de consommation électrique (et donc de vitesse) entre des circuits semiconducteurs (CMOS, III-V, Si-Ge) et des circuits supraconducteurs RSFQ. Crédits : Hypres Inc., Elmsford, NY

7.4.3. Groupes de recherche de R. Schoelkopf et M. Devoret à l'université de Yale, New Haven, CT

M. Devoret et R. Schoelkopf nous ont reçus et ont résumé leurs travaux des trois dernières années à l'aide de posters affichés dans le laboratoire. Leurs deux groupes (<http://www.eng.yale.edu/qclab/> et <http://www.eng.yale.edu/rslab/>) travaillent en étroite collaboration entre eux et avec le groupe de théoriciens de S. Girvin, également à Yale. Celui de R. Schoelkopf a introduit une nouvelle méthode de pilotage et de lecture de la boîte à paire de Cooper (CPB), en plaçant au ventre de champ électrique d'un résonateur micro-onde coplanaire dont la fréquence de résonance est légèrement différente de la fréquence de transition du qubit. Le qubit est piloté par une impulsion micro-onde quasi résonante envoyée à travers le résonateur. Il est lu par une seconde impulsion micro-onde, cette fois-ci à la fréquence du résonateur, dont la phase est avancée ou retardée selon l'état quantique du qubit : la lecture de ce dernier est donc dispersive. Un grand avantage de la méthode est que le résonateur sert également de filtre protégeant le qubit du monde extérieur, et donc, de la décohérence. La physique que permet ce type de puce va bien au-delà de celle des bits quantiques : elle ouvre la voie d'une nouvelle électrodynamique quantique en cavité, où la CPB joue le rôle d'un atome artificiel couplé au champ quantique du résonateur (la cavité).

Récemment, les chercheurs de Yale ont introduit une nouvelle version de la CPB, le *transmon*, en la symétrisant et en augmentant la capacité en parallèle avec ses JJ. Ce faisant, ils ont diminué la sensibilité du qubit vis-à-vis du bruit en champ électrique, bruit ayant pour origine la présence de défauts pouvant se charger et se décharger à proximité des îlots. Or c'est précisément ce bruit en charge qui limitait le temps de cohérence des versions précédentes de CPB. Le transmon a ainsi atteint un temps de cohérence de 2 µs, limité par le phénomène de relaxation : c'est le meilleur résultat obtenu à ce jour en termes de cohérence d'un qubit Josephson.

Le groupe de M. Dévoret a concentré son effort sur le développement de méthodes de lecture en un coup de la CPB. Il a d'abord travaillé sur le quantronium, une version de CPB où le qubit est lu en phase par une JJ additionnelle en parallèle avec une capacité. Ce résonateur de lecture piloté légèrement en dessous de sa fréquence de résonance à une amplitude micro-onde suffisamment grande, présente un phénomène de bifurcation dynamique. Ce phénomène augmente la sensibilité de lecture d'un important facteur (typiquement 5) permettant en principe une lecture du qubit en un coup. La discrimination des états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ n'a malheureusement atteint en pratique que 60-65% avec cette méthode. Le groupe a également démontré que si la projection du qubit sur l'état $|0\rangle$ était purement non destructive, celle sur l'état $|1\rangle$ n'était en pratique non destructive qu'avec une probabilité de 50 %. Il est à noter que les mêmes concepts et méthodes appliqués ultérieurement à des qubits en flux à l'université de Delft (Pays-bas) ont conduit respectivement à une discrimination des états de 90% et à une lecture non destructive de l'état $|1\rangle$ avec une probabilité de 85%. M. Dévoret a également appliqué la méthode de la bifurcation à des résonateurs coplanaires distribués (M. Metcalfe *et al*, Phys. Rev. B **76**, p. 174516, 2007).

En 2007, les chercheurs de Yale, ont fait la démonstration du couplage de deux transmons (voir figure ci-dessous) placés en deux ventres de champ électrique d'un résonateur (J. Majer *et al*, Nature **449**, p. 443, 2007). En effet, en plus de ses rôles de pilotage et de lecture, le résonateur joue également le rôle de bus de couplage pour les qubits. Dans cette démonstration, le couplage était dispersif, aucun des deux qubits n'étant mis à résonance avec la cavité. L'interaction était de type SWAP, l'état $|01\rangle$ des deux bits se transformant en $|10\rangle$ et réciproquement. Bien que chaque qubit n'ait pas son dispositif de lecture propre, les quatre états $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ et $|11\rangle$ ont pu être discriminés par des déphasages tous différents de l'impulsion micro-onde transmise à travers le résonateur ; cependant la sensibilité n'était pas suffisante pour lire l'état du registre en un coup et les corrélations sur les deux qubits n'ont pas pu être mesurées. On ne peut donc parler de caractérisation complète de porte à deux qubits.

Lors de notre visite, une expérience sur deux quantronioms aux extrémités de deux résonateurs distribués, opérés dans le mode bifurcation, était en cours. Nous avons assisté à la prise des données spectroscopiques sur les deux qubits simultanément.

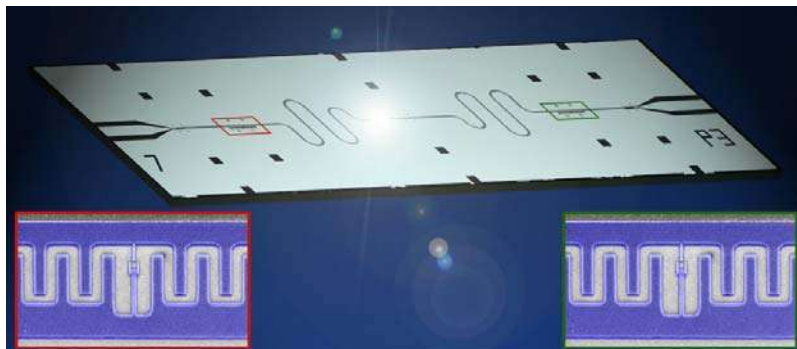


Figure 22 Couplage de deux 'transmons', qubits dérivés de la boîte à paire de Cooper. Les qubits, encadrés en rouge et en vert, sont placés aux ventres de champ électrique d'une cavité micro-onde faisant office de bus de couplage. Crédits: R. Schoelkopf, Yale University, <http://www.eng.yale.edu/rslab/>

7.4.4. Groupe de recherche de R.H. Koch à IBM Watson, Yorkton, NY

Lors de notre visite à IBM Watson (<http://www.watson.ibm.com/index.shtml>), nous avons été reçus par D. DiVicenzo, théoricien et contributeur important dans le domaine du traitement quantique de l'information. Il ne nous a pas parlé de ses propres travaux théoriques, mais plutôt du travail expérimental effectué dans le groupe de R.H. Koch, récemment décédé, visant à développer une architecture intégrable (« scalable ») de qubits en flux (voir figure ci-dessous). Les idées originales d'IBM sont d'une part d'ajouter un bouton de réglage de la hauteur de la barrière tunnel entre les deux états du qubit en flux, et d'autre part de transférer l'état quantique du qubit à un résonateur micro-onde couplé directement au qubit, afin de protéger cet état du déphasage et de la relaxation (R. H. Koch *et al*, Phys. Rev. Lett. **96**, p. 127001, 2006). Le pilotage du qubit consiste en des rampes de flux relativement lentes, et non en des impulsions radiofréquences ou micro-ondes quasi résonantes avec le qubit. Lors de la lecture, qui s'effectue à l'aide d'un SQUID couplé au qubit par inductance mutuelle, les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ sont presque classiques, et donc très protégés de la relaxation. Toutes ces fonctionnalités se payent néanmoins par une complexité certaine du dispositif et une taille importante du qubit. L'observation des oscillations cohérentes du système a conduit à un temps de cohérence très prometteur de $2.3\mu\text{s}$.

Le groupe envisage par ailleurs l'intégration de ces qubits. Ces derniers seraient arrangés selon une matrice carrée, chaque pixel comprenant le qubit en flux, son résonateur associé, trois boucles de flux et deux SQUIDs de lecture ; chaque qubit serait couplé à ses premiers (et éventuellement second) voisins par de simples lignes d'inductance mutuelle. La puce quantique serait connectée à une puce comprenant les circuits de contrôle délivrant les rampes de flux et les signaux pour les SQUIDs de lecture, à l'aide de fils (wire bonding) supraconducteurs.

Nous avons visité le laboratoire où sont effectuées les mesures de qubit. L'expérience n'était pas en cours, mais nous avons pu passer en revue le matériel utilisé.

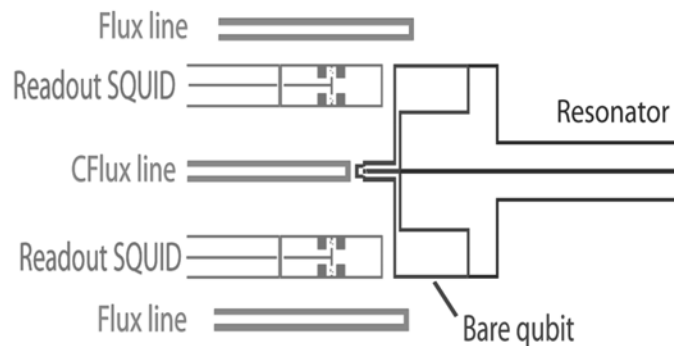


Figure 23 Schéma électrique du qubit en flux développé dans le groupe de R.H. Koch. Crédits : R. H. Koch, IBM Watson, Yorktown Heights.

7.5. Conclusion sur les visites

La série de visites organisée durant les 5 jours de la mission a largement couvert le domaine de l'information quantique. Si elle n'a évidemment pas donné une vision exhaustive des recherches effectuées aux USA dans le domaine (ce qui est impossible sur un temps aussi court), elle s'est révélée très intéressante à plusieurs titres.

Tout d'abord, parmi les groupes visités, plusieurs sont leaders au niveau mondial dans le développement d'un type de bits quantiques. Prendre connaissance des travaux en cours, en pouvant observer les moyens mis en oeuvre s'est donc révélé passionnant. Le leadership du groupe de C. Marcus pour les boîtes quantiques semi-conductrices, des groupes de Yale pour les qubits Josephson

basés sur la boîte à paire de Cooper, ou de celui de M. Lukin pour les centres NV dans le diamant est d'autant plus intéressant à signaler que beaucoup des premiers succès obtenus sur ces types de qubits l'ont plutôt été en Europe et au Japon.

Les moyens mis en œuvre se sont révélés varier considérablement d'un laboratoire à l'autre. Mais les meilleurs résultats du domaine sont clairement obtenus dans les laboratoires à la fois riches, ayant su impliquer plusieurs équipes sur le même sujet, et ayant su mettre en place une infrastructure technique adaptée à une recherche fondamentale essentiellement menée par des jeunes chercheurs non permanents.

Un autre point intéressant est l'existence de laboratoires privés (IBM, HP, Bell) impliqués dans cette recherche fondamentale, contrairement à ce qui existe en Europe. Ce fait ne doit cependant pas cacher, que les recherches américaines en traitement quantique de l'information restent essentiellement financées par de l'argent public (et quelquefois par les fonds propres d'universités, comme à Harvard).

La délégation a aussi pu se rendre compte que, comme au Japon et en Europe, le traitement quantique de l'information à l'état solide reste une activité de recherche très fondamentale aux USA, encore éloignée de toute application. Les gros laboratoires privés américains visités par la délégation ne tiennent pas d'autre discours, et une société comme Hypres semble d'ailleurs avoir choisi de communiquer très raisonnablement sur le sujet. La stratégie de communication de la société canadienne D-wave, évoquant un ordinateur quantique bientôt opérationnel, reste donc isolée au niveau mondial.

8. CONCLUSION

Les recherches sur l'électronique 'post-CMOS' sont très actives aux États-Unis, avec des financements conséquents. Quelques industriels, comme IBM et HP, ont encore des laboratoires propres impliqués dans une recherche de qualité en physique fondamentale, très en amont des applications électroniques, mais ils représentent une exception. La plupart des industriels préfèrent, comme Intel, financer des recherches académiques en attendant qu'une technologie émerge, et en se tenant prêt à pouvoir la développer rapidement. Ainsi, l'industrie de la microélectronique s'est organisée autour de plusieurs programmes de financement, dont le FCRP (Focus Center Research Program) et le NRI (Nanoelectronics Research Initiative) avec des budgets proches de 150M\$, et une structuration complexe mais efficace en termes de thématique, d'objectifs et de pôles géographiques.

Aux États-Unis, les recherches 'post-CMOS' se font donc principalement dans les laboratoires universitaires et nationaux. Ces derniers disposent de financements fédéraux importants, au travers notamment de la NNI (National Nanotechnology Initiative, 1.3 milliard de dollars en 2007), ainsi que de certains financements régionaux comme en Californie avec le CNSI (California NanoSystem Institute). De nombreuses salles blanches ont vu le jour récemment, faisant partie entre autres du NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network) ou des 5 nouveaux centres NSRC (Nanoscale Science Research Centers) du DOE. Grâce à ces instruments de haut niveau, les laboratoires américains peuvent prétendre relever le défi du post-CMOS.

Il est difficile cependant de prédire laquelle des pistes scientifiques explorées lors de cette mission pourra se targuer un jour de remplacer le transistor CMOS. Les prochaines générations de transistors silicium incluront de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures, et peut être utiliseront de nouvelles méthodes de fabrication (nanoimprint, lithographie EUV). Avec une perspective plus lointaine, certaines fonctions actuellement réalisées par les technologies traditionnelles basées sur le silicium pourraient être remplacées par des composants de la spintronique et/ou de l'électronique moléculaire. Quant à la mise au point d'un véritable ordinateur quantique électronique, il ne s'agit pour le moment que d'une belle idée, dont l'exploration ne fait que commencer.

9. ANNEXES

9.1. Programme des visites

Lundi 3 décembre

COLUMBIA UNIVERSITY, Department of Physics
530 West, 120th Street, New York, NY, Tel: 212-854-4747 or 212-854-3961,

Welcome by **Phillip KIM**, **Horst STORMER**, (Nobel Prize 1998) and **James YARDLEY**, Managing Director of Columbia Nanocenter

9:10	Presentation of the research in France, by French delegation
10:00	Jim YARDLEY , Managing Director of Columbia Nanocenter <i>Columbia Nanocenter Overview</i>
10:20	Tony HEINZ , Prof. Physics <i>Optics on Nanomaterials</i>
10:40	Philip KIM , Assoc. Prof. Physics <i>Electronics in Graphene</i>
11:00	Elena POLYKOVA , Post Doc Physics <i>STM on Graphene</i>
11:20	Latha VENKATARAMAN , Assist. Prof. Applied Physics, <i>Single Molecule Conduction</i>
11:40	Ken SHEPARD , Assoc. Prof. Elec. Engineering <i>NanoElectronics</i>

HYPRES, Inc.

175 Clearbrook Rd., Elmsford, NY 10523, Tel : 914-592-1190

14:00	Dick HITT , President and CEO, Steve KAPLAN , Senior Scientist Welcome and opening remarks
14:10	Member(s) of the delegation: Mission, goals and preliminary findings
15:00	Oleg MUKHANOV , HYPRES General Manager <i>Digital-RF Electronics</i>
16:00 -17:00	Tour of HYPRES facilities

Mardi 4 décembre

IBM T. J. WATSON RESEARCH CENTER

1101 Kitchawan Road, Route 134, Yorktown Heights, N.Y. 10598 Tel: (914) 945-3000

Welcome by **William J. GALLAGHER**, Sr. Manager, **Tom THEIS**, Director of Physical Sciences, and **David DiVINCENZO**

- 9:00 **David DiVINCENZO**, Research staff member
Overview of Physical Sciences at IBM
- 9:30 French scientists Presentation of their interests
- 10:00 **William GALLAGHER**, Sr. Manager
Exploratory Nonvolatile Memory
- 10:30 **Yu Ming LIN**, Research staff member
Advances in CNT devices and circuits
- 10:45 **Marcus FREITAG**, Research staff member
Carbon nanotubes optoelectronics
- 11:00 Tour of the Laboratories

YALE UNIVERSITY, Department of Applied Physics

Becton Center, 15 Prospect Street, New Haven, CT 06520-8284

- 15:00 **T.P. MA**, Chairman, department of Electrical Engineering;
Prof. Applied Physics, *Presentation of the activities in III-V
Mosfets and NV Memories*
- 15:55 **CHARLES H. AHN**, RG Leader, CRISP (Center for Research
and Interface Structures and Phenomena), Assoc. Prof.
Applied Physics and Physics; *Spintronics at CRISP*
- 16:30 – 18:00 **Robert SCHOELKOPF**, Prof. Applied Physics and Physics,
Co-director of the Center for Microelectronics Materials &
Structures (μ ELM)
Quantum computers
- Michel DEVORET**, Prof. Applied Physics & Physics,
Director of Applied Physics Nanofabrication Lab. ;
Quantum computers

Mercredi 5 décembre

HARVARD UNIVERSITY, Cambridge, MA

- 8:45 **Charles MARCUS**, Prof. Physics; Scientific Director of the Center for Imaging and Mesoscale Structures; *Physical Effects in Mesoscale Condensed Matter*
- James GOTFREDSON**, Asst. to Profs. Marcus & Yacoby
- 9:35 **Eric MARTIN**, Technical Director, Center for Nanoscale Systems,
Tour of facilities
- 10:15 **Mikhail LUKIN**, Prof. Physics
Activities in Quantum Plasmonics & NV Centers

MIT, Cambridge, MA

- 11:30 **Karl K. BERGGREN**, Assoc. Prof. Elec. Engineering
Lithography beyond the 10nm frontier
- 13:30 **Dimitri ANTONIADIS**, Prof. Elec. Engineering, Director of Microsystems Technology Lab (MTL), Member of the National Academy of Engineering;
Presentation of MTL and NRI FCRP

Jedi 6 décembre

STANFORD UNIVERSITY, Palo Alto, CA

- 9:00 **H.-S Philip WONG**, Prof. Elec. Engineering, Center for Integrated Systems (CIS), *Research Overview*
- 10:00-11:00 **K. SARASWAT**, Prof. Elec. Engineering, CIS
Novel Material and Device Structures for Advanced CMOS Technology

HEWLETT-PACKARD LABORATORIES, Palo Alto, CA

Quantum Science Research, Hewlett-Packard Laboratories
1501 Page Mill Road (ms 1123), Palo Alto, CA 94040 , Tel: +1 650 857 5115

- 14:00 **David FATTAL**, Research staff member
General presentation of QSR activities
- 14:15 **Wei WU**, Research staff member
Molecular electronics

- 14:45 **Greg SNIDER**, Research staff member
new CMOS architectures / computing with crummy devices
- 15:00 **Ted KAMINS**, Principal Scientist
SiGe / nanowires
- 15:30 **Charles SANTORI**, Research staff member
NV center e-spin as quantum register
- 16:30 – 17:30 Lab visits
- 19:00 Diner with **Kamel OUNADJELA**, Co-Founder, and **Alain BLOSSE**, Technology Director, **CALISOLAR INC.**

Vendredi 7 décembre

IBM ALMADEN RESEARCH CENTER

650 Harry Road, YHSA-D1, San Jose, CA. 95120-6099, USA, Phone: (408) 927-2390;

- 10:00 **CAROLYN WALLACE**, Manager Almaden Customer Program; *Welcome / Agenda*
- 10:10 **GIAN-LUCA BONA**, Manager Science and Technology
Almaden Nanoscience Research
- 10 :30 **BULENT KURDI**, Manager Nanoscale Device Integration
Nano-memories
- 10 :50 **GUENOLE JAN**, Research Scientist
Tour of Spintronics Lab (Stuart Parkins)
- 11:30 **GREG WALLRAFF**, Research Scientist
Lithographic Patterning and Placement of DNA Nanostructures
- 11:50 **DAN RUGAR**, Manager Nanoscale Studies
Quest for a Molecular Structure Microscope
- 12:10 **MARKUS TERNES**, Research Scientist
Manipulation and Detection of Atomic Scale Magnetism

INTEL CORP.

- 15:00 **PAOLO GARGINI**, Director of Technology Strategy for Intel Corporation., ex Chairman of the ITRS
US Industry Nanotechnology Initiatives

9.2. Photographie de groupe



De gauche à droite : Denis Vion, Erik Dujardin, Simon Deleonibus, Dominique Mailly, Daniel Ochoa, Jean-Baptiste Kempf, Christian Glattli

Le groupe pose devant un exemplaire historique de l'unité de stockage IBM 350, en exposition dans le hall d'entrée du site d'IBM Almaden. Il s'agit du premier disque dur produit par IBM de 1956 à 1961. Il était constituée de 50 disques magnétiques de 61 cm de diamètre, tournant à 1200 tours/minute, pour une capacité de stockage de 4.8 MB et un taux de transfert de 8800 bits/s. Ce disque dur avait été conçu pour l'ordinateur IBM 305 RAMAC, produit à seulement 1000 exemplaires. Il était un des derniers ordinateurs à utiliser la technologie des lampes à vide, et coûtait \$100,000 de l'époque.

9.3. Biographie des participants

Simon Deleonibus

MSc and PhD in Applied Physics from Paris University in 1979 and 1982 respectively. He joined Thomson Semiconducteurs (Grenoble) in 1981 as a development and transfer to production process integration engineer. He joined LETI(CEA) in 1986 as a device engineering and process modules development expert for CMOS and Flash memories applications.

Since 1996, he is the manager of the Ultimate CMOS project. Since beginning 1999, he is the director of the Electronic Nanodevices Laboratory(48 researchers). He manages several industrial, national and European funded projects.

Published papers or submitted: more than 350 (conferences and journals ; 40 invited) ; owns 30 patents related to these fields among them the initial patent on contact plug principle.

Member of several International Conference program Committees. Among them he has been European Chair and Member of the VLSI Technology Symposium(from 2000 to 2006). Member of the 1998 and 1999,2004 and 2005 International Electron Devices Meeting (IEDM) program committee. Member of the ESSDERC program committee and Responsible for the ESSDERC2005 Tutorials. Member of the International Technology Roadmap of Semiconductors(ITRS). Member of the Board of Directors of the Nanosciences Foundation. Member of the European Research Council Engineering Panel.

Since 1998, he lectures on microelectronics devices physics and technology and nanosciences in different French Institutions and Universities

Member the Electrochemical Society.

He was nominated Research Director of French CEA in 2002.

He has been an IEEE Distinguished Lecturer since January 2004.

He was awarded the title of “Chevalier de l’Ordre National du Mérite” by the French Presidence in November 2004.

He is the recipient of the “2005 Grand Prix de l’Académie des Technologies - Prix Chéreau Lavet”.

He has been elected Fellow of the IEEE since January 1st, 2006.

Erik Dujardin

Erik DUJARDIN was born in 1971 and graduated in 1995 from the R&D engineer school Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de Paris (ESPCI) where he received his initial training in both physics and chemistry (major in Chemistry). In parallel, he obtained an MSc in Molecular and Materials Sciences in 1995 after a one year project on the synthesis and physical chemistry of organic photochromic molecular switches with complexing and magnetic properties under the supervision of Prof. J.-M. Lehn (Collège de France, Paris). He obtained a PhD from the P. & M. Curie University in Paris in 1999. During his doctoral studies, under the supervision of Prof. T. W. Ebbesen at the NEC Research Institute (Princeton, NJ, USA), he focused his interests on the size effects on mechanical, electronic and wetting properties of curved and flat graphitic materials. In 2000, he joined Prof. S. Mann's group (Bristol, UK), where he worked on several projects in biomimetic nanomaterial chemistry primarily on synthesizing and self-assembling uniaxial arrays of metallic nanowires. His second post-doctoral position, with Dr. J.-P. Bourgoin in the Atomic Energy Commission (CEA, Saclay, France) in 2002, was dedicated to the fabrication of carbon nanotube-based nanoelectromechanical devices

Current research activities.

In 2003, he was appointed to a tenured position in the Nanoscience Group (Group leader: Christian Joachim) of the CEMES, a French CNRS research unit in Toulouse. In relation to the theoretical development of the concept of monomolecular electronics concept at CEMES, he started a new activity aiming at testing experimentally this concept using a top-down approach based on nanostructured graphene. He is also interested in using metallic colloidal nanoparticle to self-assembled plasmonic complex structures (chain networks) able to confine, enhance and propagate light field at a sub-20 nm lateral resolution opening a new ways to address single molecules with photons. As a tool relevant to both these topics, he is developing a method to manipulate and deposit sub-100 nm liquid droplets with an apertured AFM tip as a way to pattern a surface or deposit molecules at a pre-determined location.

Publications.

35 publications in high quality international peer-reviewed journals, including 3 invited review articles and 3 book chapters, plus 3 refereed international conference proceedings.

Scientific responsibilities.

Since 2005, E. Dujardin has been a member of the Observatory for Micro and Nano Technologies (OMNT). Within the Molecular Electronics committee, he is more specifically in charge of surveying graphene, bio-nanotechnology for electronics and surface nanopatterning.

Christian Glattli

Christian Glattli obtained his doctorate in 1986 at the University of Paris XI. Since 1995 he has been head of the Nanoelectronics group at the Service de Physique de l'Etat Condense, at the CEA in Saclay, France. In 2000, he has created the Mesoscopysics Group at the Laboratoire Pierre Aigrain, of the Ecole Normale Supérieure Paris, and has the scientific co-direction of the group.

His main field of interest is Fundamentals of Quantum Nanoelectronics, quantum physics of 2D electron gas, carbon nanotubes and, more recently, Graphene. Since 2000 his activities have included : quantum noise and quantum transport at very high frequencies, photo-assisted electron-hole pairs quantum partition noise, Quantum statistics of photon emitted by a quantum conductor using an original Hanbury-Brown Twiss experiment at 20mK and GHz frequencies, the first measurement of the quantum charge relaxation of a conductor associated with a violation of Kirchhoff's laws (Science 2006), the realization of an on-demand Single Electron Source (Science 2007), Quantum transport experiments in carbon, and the fabrication of Graphene , measurement of Quantum Hall Effect on Graphene (recent on-going activity). He was awarded the Hewlett-Packard (Agilent) Europhysics Prize in 1999 and the Silver Medal of the CNRS in 1998 for his research.

Dominique Mailly

Dominique Mailly obtained his PhD from the University of Orsay in France in 1983, under the direction of M. Ribault and D. Jérôme. The title of the thesis was 'Realization of a SQUID based magnetization setup working under high hydrostatic pressure and very low temperature : measurement of the Meissner effect in organic superconductors'. He was a post-doc at UC Berkeley in 1984, in the R. Packard group, and upon his return to France joined the Laboratory of Microstructures and Microelectronics in Bagnex as a CNRS research fellow. His research was focused on mesoscopic physics and nanomagnetism . In 1995 he became head of the group "mesoscopic physics" and in 1997 director of research in the Laboratory of Microstructures and Microelectronics. In 2001 he was appointed head of the "Physics and Technology of Nanostructures" group at the Laboratory of Photonics and Nanostructures in Marcoussis, and since December 2006 has served as Deputy Director of this Laboratory. In 1997 he was appointed a Director of Research at the CNRS, and in June 2002 was awarded their silver medal.

Denis Vion

Denis Vion (42) is currently senior physicist in the quantum electronics (Quantronics) group of the French atomic energy commission (CEA), in Saclay (France). He received his PhD in 1992 from Lyon University for his work at CERN on the residual resistivity of niobium-coated superconducting cavities for particle acceleration. Then he was post-doc (1993-1996) in the Quantronics group, where he worked on Single Cooper pair boxes and Single Cooper pair transistors. In 1996-1997, he was teacher in chemistry and physics in several high schools. Then, he managed during two years the reliability group of Pixtech, a company involved in the development of field effect flat panel displays. In 2000, he got a permanent position in CEA's Quantronics group to develop superconducting quantum bits. With his colleagues, he demonstrated the first Josephson qubit with long coherence time ($\sim 1\mu\text{s}$) and single shot readout: the quantrionium. He taught Josephson quantum bit physics at several summer schools on Quantum Information Processing.

Main publications on the subject:

D. Vion, A. Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina , D. Esteve and M. Devoret: "Manipulating the quantum state of an electrical circuit", Science **296** (2002).

G. Ithier, E. Collin, P. JOyez, P.J. Meeson, D. Vion, D Estève, F. Chiarello, A. Shnirman, Y. Makhlin, J. Schrieffer, and G. Schön. "Decoherence in a superconducting quantum bit circuit", Phys. Rev. B. **72**, 134519 (2005).

9.4. Tables des illustrations

Figure 1 Initiatives pilotées par l'industrie américaine concernant le CMOS Ultime et le Post-CMOS. Crédits : P. Gargini, INTEL corp.....	8
Figure 2 Le FCRP (Focus Center Research Program) est une association à l'interface entre l'industrie, le gouvernement fédéral et les universités, finançant des projets de recherche universitaires sur les recherches de CMOS très avancé se situant sur les nœuds 22-16nm. Crédits : Rob Rutenbar, Carnegie Melon University, FCRP.....	9
Figure 3 Nombre de niveaux de métaux d'interconnexions nécessaires pour maintenir le temps de transit par porte constant en fonction du nœud technologique. On a tenu compte d'une mise à l'échelle des dimensions critiques (ligne et espace) de 0,7 par génération. Simulations pour le métal aluminium et cuivre. (Intel IEDM 1995).....	10
Figure 4 Evolution d'après ITRS 2005 de l'épaisseur équivalente d'isolant de grille (EOT) du courant de fuite (Jg) pour les différentes technologies planar bulk, film mince (UTB FD) et Double grille (DG). La fuite limite admissible (consommation statique) pour l'isolant de grille classique SiON est donnée en rouge : au point de croisement de la limite admissible un isolant High K est nécessaire. En effet, des annonces ont été faites en 2007 pour la mise en production de tels matériaux (Oxyde d'Hafnium HfO ₂) (ITRS 2005)	11
Figure 5 Principe de fonctionnement d'une mémoire magnétique MRAM.....	14
Figure 6 Principe de fonctionnement de la mémoire « racetrack » développée à IBM Almaden. Crédits : Gianluca Bona, IBM Almaden	15
Figure 7 Réseau de mémoires « crossbar » à base de nanofils à changement de phase (haut). Intégration dans un composant à l'aide de nanofils de Ge (bas). Crédits : Philip Wong, Stanford University.....	17
Figure 8 Gauche : Mesures de la résistance d'un nanotube de carbone en fonction de sa longueur. Droite : mesure du libre parcours moyen électronique en fonction de la température. Crédits : Philip Kim, Columbia University.	19
Figure 9 Nanotransistor réalisé dans le laboratoire de P. Kim à l'aide d'une nanoconstriction de graphène recouverte d'une électrode. Crédits : Philip Kim, Columbia university.....	20
Figure 10 Mesure par STM d'une surface de graphène (gauche) ou on distingue les cycles carbonés, et mesure de la rugosité de surface (droite). Crédits : Elena Stolyarova, Columbia University.	21
Figure 11 Schéma de principe de l'expérience (jonction à cassure contrôlée mécaniquement) menée par Latha Venkataraman pour mesurer la conductance de différentes molécules en solution. Crédits : Latha Venkataraman, Columbia University	22
Figure 12 Exemple de recherches en électronique moléculaire menées à IBM, concernant la modification induite électriquement de la structure de molécules organiques. Crédits : David Di Vincenzo, IBM Yorktown.....	22
Figure 13 Composant à nanotube de carbone suspendu, permettant d'améliorer le bruit des nanotransistors. Crédit : Yu-Ming Li, IBM Watson.....	23

Figure 14 Principe de fonctionnement de l'expérience de microscopie de champ proche par résonance magnétique, menée à IBM Almaden. Crédits : Dan Ruger, IBM Almaden.	25
Figure 15 Micrographie électronique montrant une mémoire 66x66 de 4kb réalisée par nanoimprint en 2004 aux laboratoires HP. Crédits : S. Williams, Hewlett Packard.	26
Figure 16 Micrographie électronique d'un dispositif utilisé par le groupe de Charles Marcus à Harvard pour étudier l'effet Hall quantique fractionnaire, et l'éventuelle statistique non abélienne qu'il pourrait exhiber. Crédits : Charles Marcus, Harvard, http://marcuslab.harvard.edu/MarcusWebPageFQHE.pdf	30
Figure 17 Structures bidimensionnelles créées par le groupe de Don Eigler à IBM Almaden, en déplaçant individuellement des atomes en surface à l'aide d'une pointe STM. A droite le 'quantum coral' permet de visualiser les ondes stationnaires électroniques résonantes à l'intérieur du cercle. Crédits : Don Eigler, IBM Almaden.	32
Figure 18 Structure de la maille atomique d'un centre NV dans le diamant, et schéma montrant les différents niveaux d'énergie du défaut.	37
Figure 19 Recherches du groupe QSR de HP sur les centres NV du diamant. Gauche : Imagerie de l'orientation cristallographique des centres NV. Droite : couplage de centres NV par un microrésonateur optique. Crédits : Stanley Williams, Hewlett Packard.	38
Figure 20 Micrographie électronique d'un bit quantique réalisé par le groupe de C. Marcus dans une hétérostructure AsGa/AlAsGa. Le qubit est formé de 2 spins électroniques confinés dans deux boîtes quantiques (cercles) définies par les électrodes de grille L, M, R et T. Les électrodes R et QR définissent un contact ponctuel quantique servant à lire l'état du qubit. Crédits : Charles Marcus, Harvard University	40
Figure 21 Graphique montrant les fortes différences en termes de consommation électrique (et donc de vitesse) entre des circuits semiconducteurs (CMOS, III-V, Si-Ge) et des circuits supraconducteurs RSFQ. Crédits : Hypres Inc., Elmsford, NY	43
Figure 22 Couplage de deux 'transmons', qubits dérivés de la boîte à paire de Cooper. Les qubits, encadrés en rouge et en vert, sont placés aux ventres de champ électrique d'une cavité micro-onde faisant office de bus de couplage. Crédits: R. Schoelkopf, Yale University, http://www.eng.yale.edu/rslab/	44
Figure 23 Schéma électrique du qubit en flux développé dans le groupe de R.H. Koch. Crédits : R. H. Koch, IBM Watson, Yorktown Heights.....	45