

AMBASSADE DE FRANCE AUX ETATS-UNIS
MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE
CONSULAT GENERAL DE SAN-FRANCISCO

LA SPINTRONIQUE AUX ETATS-UNIS

Un Aperçu des Recherches

Mars 2005

Christophe Lerouge (attaché scientifique)

Claude Chappert (IEF Orsay, CNRS)

Joël Cibert (Laboratoire Louis Néel, CNRS)

Jean Pierre Nozières (Spintec)

Frédéric Petroff (Unité Mixte de Physique CNRS/Thales)

RÉSUMÉ

En octobre 2004, un groupe d'experts français s'est rendu aux Etats-Unis pour évaluer le développement des recherches dans le domaine de la spintronique. Des centres de recherches universitaires ainsi que des entreprises ont été visités.

La mission a pu constater la vitalité des recherches menées aux Etats-Unis dans ce domaine. La spintronique bénéficie, en effet, des fonds considérables attribués par les agences de recherche fédérales en faveur des nanotechnologies et du partenariat entre les laboratoires académiques et les grandes entreprises d'électronique.

Des infrastructures se mettent en place et devraient permettre à terme d'aider les projets de recherche dans ce domaine.

Un Aperçu des Recherches

A l'initiative du service pour la science et la technologie du Consulat Général de France à San Francisco, un groupe d'experts français s'est rendu aux Etats-Unis en octobre 2004. La mission avait pour objectif l'analyse de l'effort de recherche en spintronique, développé actuellement dans les centres d'excellence universitaires ainsi que dans les entreprises américaines.

L'électronique de spin (ou spintronique) est une nouvelle discipline à la frontière entre magnétisme et électronique qui cherche à tirer parti du spin des électrons comme d'un nouveau degré de liberté. Les applications sont attendues dans le domaine des mémoires magnétiques (MRAM¹), le stockage des données à ultra haute densité, et à plus long terme dans la conception de nouveaux composants logiques (éléments de logiques reprogrammables et hétérostructures).

La mission s'est déroulée sur une période de temps réduite. L'évaluation qui en découle n'est donc que partielle. Elle permet néanmoins d'illustrer de manière significative les efforts très importants consacrés aux Etats-Unis à la thématique de l'électronique du futur. Les informations détaillées sur les travaux des laboratoires visités sont reprises en annexe.

I – Le contexte de l'électronique du futur :

Les recherches en électronique de spin se situent dans le contexte plus large de l'évolution régulière de l'électronique.

Les lois de Moore rythment l'évolution de l'électronique, en prévoyant un accroissement régulier des performances des composants grâce à une diminution des dimensions et une augmentation de la densité d'intégration des transistors. Les unités de production les plus modernes atteignent actuellement les 90nm². Les générations suivantes à 65nm puis à 45nm seront accessibles grâce à une évolution des technologies actuelles mais au prix de lourds investissements. En dessous de ces dimensions, de nombreux problèmes apparaîtront (grilles des transistors trop minces avec diminution de l'effet capacitif, augmentation des courants de fuite, complexité des composants, consommation électrique) et ne permettront pas de poursuivre la miniaturisation tout en maintenant le niveau de performances. En particulier, la dissipation thermique semble la limite la plus évidente à une prolongation de la loi de Moore. La Roadmap des semiconducteurs ITRS³ prévoit que ces dimensions seront atteintes d'ici dix à quinze ans. Les industriels et les universités se mobilisent pour trouver de nouvelles solutions remplaçant la technologie actuelle du CMOS. Les enjeux sont considérables avec un marché global estimé à plus de 200 milliards de dollars en 2004.

¹ Magnetic Random Access Memory : Dans ces mémoires, l'information n'est plus stockée sous la forme d'une charge dans une capacité comme dans les DRAM ou les flash, mais sous forme d'une direction d'aimantation dans une jonction tunnel magnétique. Celles ci sont des jonctions métal/isolant/métal dans lesquels les électrodes métalliques sont ferromagnétiques . On y observe un effet de magnétorésistance , i.e. une variation importante de la résistance électrique de la jonction en fonction des variations des directions des aimantations des couches ferromagnétiques.

² ST en France vient récemment de s'équiper de la première plate forme mondiale de production à 65nm . Les autres entreprises de semiconducteurs devraient prochainement suivre courant 2005.

³ International Terchnology Roadmap for Semiconductors : <http://public.itrs.net/>

Objectifs technologiques et thématiques de recherche :

Les objectifs sont nombreux pour améliorer les performances des composants (consommation, rapidité de traitement du signal, stockage téraoctet, composants térahertz) et pour définir de nouvelles fonctionnalités (circuits nanophotoniques, interfaces biologiques).

Ils correspondent aux besoins très forts de l'industrie et de la société en capacité de calcul, en vitesse de transmission et en stockage des données. Ces nouveaux composants nécessiteront de définir de nouveaux types de transistors et plus généralement de nouvelles cellules de base. Les grandes thématiques de recherche peuvent se regrouper selon les quatre domaines suivants :

- **Silicium ultime.** Les travaux portent sur la définition de nouvelles architectures des transistors CMOS, en particulier pour augmenter le nombre de grilles actives et sur les études de couches ultraminces pour les oxydes de grille.
- **Matériaux III-V.** Les hétérostructures sont prévues pour les composants utilisés dans le domaine du térahertz : circuits ultrarapides et optoélectroniques.
- **Electronique moléculaire.** Les dispositifs utilisent les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des molécules pour réaliser de nouvelles fonctions : notamment utilisation des nanotubes de carbones, des nanofils de semiconducteur ou des quantum dots.
- **Spintronique et nanomagnétisme** : l'aimantation est utilisée pour porter l'information notamment pour le stockage des données à ultra-haute densité et pour de nouveaux types de composants logiques.

Outre les recherches sur la définition de ces nouveaux types de composants, les travaux portent également sur les nouvelles méthodes de fabrication pour réduire les coûts et augmenter les productivités. De nombreux problèmes restent à résoudre. Les dimensions nanométriques nécessitent en effet des techniques de fabrication beaucoup plus précises. Les architectures 3D sont également de plus en plus difficiles à réaliser. Plusieurs pistes sont envisagées pour les nouvelles méthodes de fabrication «top-down» (lithographie et nanoimprint) ou «bottom-up» (assemblage moléculaire) :

- **Lithographie optique** : Les travaux portent sur la lithographie par immersion avec des longueurs d'onde d'exposition à 193nm, à 157 nm puis en extrême UV. Les dimensions⁴ atteignables pour les composants seront de 32nm à l'horizon 2010. D'autres recherches concernent la lithographie sans masque⁵ notamment utilisant des micromiroirs. La lithographie e-beam (faisceau d'électrons) permet d'atteindre les 10nm mais présente un coût encore beaucoup trop élevé.
- **Nanoimprint (nanoimpression).** Avec cette technique, les motifs des composants sont "imprimés" à la manière d'une presse d'imprimerie. La résine ductile est estampillée à l'aide d'une matrice dure (elle-même réalisée par une technologie e-beam). Ce mécanisme peut fidèlement reproduire des caractéristiques d'une taille inférieure à 10 nanomètres, sur des surfaces de wafer importantes.
- **Auto-assemblage et biomimétisme.** Il s'agit d'approches «bottom-up» utilisant certaines propriétés d'auto-organisation des structures : croissance des nanotubes et des nanofils, assemblages supramoléculaires. L'utilisation de biomolécules est envisagée pour mimer les mécanismes de réplication et d'organisation des systèmes biologiques.

⁴ Il s'agit des générations technologiques des composants qui correspondent à la moitié de largeur du premier niveau des interconnexions métalliques (half pitch).

⁵ Le NIST et la DARPA ont annoncé en janvier 2005 avoir stoppé le financement des technologies de lithographie sans masque. Au contraire de l'Europe et du Japon où les travaux de recherches continuent.

II – Les programmes en spintronique :

Les programmes américains en spintronique et en nanomagnétisme couvrent toute la gamme : de la recherche fondamentale amont, à la recherche appliquée jusqu'au développement effectif des applications industrielles.

1 - Les différents programmes évoqués dans les laboratoires académiques visités :

- Le développement de matériaux adaptés à l'électronique de spin :

* Les semiconducteurs magnétiques, en tant que développement de matériaux (croissance et caractérisation).

Ce travail intéresse directement les équipes désireuses de réaliser une intégration intime entre matériaux magnétiques et semiconducteurs. A ce jour, le challenge réside dans le développement :

i) de matériaux dont la température d'ordre magnétique soit largement au-dessus de la température ambiante ;

ii) de matériaux basés sur la filière III-V, mieux maîtrisée au plan industriel. Ces travaux font écho à des efforts importants de part le monde, en particulier en France et en Europe.

* Les nouveaux matériaux tels qu'alliages à forte polarisation en spin, isolants magnétiques, multicouches aux interfaces contrôlées, etc...

- Ces nouveaux matériaux sont intégrés dans des structures fonctionnelles (cette approche est également active en Europe et dans certains laboratoires nationaux). Les travaux théoriques et expérimentaux portent sur l'émission de spins polarisés, les courants de spins, l'injection et le transport dépendant du spin.

La manipulation des courants de spins dans les structures hybrides, intégrant des matériaux magnétiques et semiconducteurs dans une même hétérostructure (en particulier la conduction par effet tunnel) peut conduire à des effets nouveaux utilisables dans des composants innovants, par exemple des transistors de spins ou des interrupteurs de spins.

- Mémoires et logique magnétique reprogrammable : L'objectif est de remplacer les transistors de l'électronique à base de semiconducteurs et de développer des portes logiques basées sur les interactions de domaines magnétiques⁶. L'intérêt serait de disposer de composants réalisant à la fois des fonctions de stockage et de traitement de l'information⁷.

- la Manipulation de charges et de spins individuels de façon cohérente est un problème fondamental ainsi qu'un enjeu pour d'éventuelles applications de résonance magnétique et d'ordinateurs quantiques⁸ (mise en oeuvre physique de l'ordinateur quantique). Il s'agit de trouver les nouveaux modèles de calcul utilisant la manipulation d'une information quantique dans les semiconducteurs.

- La nanofabrication : Toutes les approches " top-down " et " bottom-up " sont étudiées par les laboratoires tant académiques qu'industriels.

⁶ Certains travaux portent en particulier sur le contrôle précis de la propagation d'une paroi magnétique dans des nanostructures.

⁷ Ces composants permettraient de gagner en vitesse, en taille et en simplicité pour la conception des appareils électroniques notamment les ordinateurs.

⁸ L'informatique quantique utilise les lois de la mécanique quantique comme opérations de calculs.

⁹ Une chambre d'épitaxie est en cours d'installation dans les locaux d'IBM Almaden.

2 - La R&D industrielle :

* Les industriels affichent à propos de l'électronique de spin des positions différentes.

- **IBM** s'implique fortement dans la spintronique et conduit en particulier des recherches sur les MRAM, sur la logique magnétique reprogrammable et sur des études fondamentales en nanomagnétisme. Des travaux vont démarrer⁹ sur les "nouveaux" semiconducteurs magnétiques dilués (grands gaps dont ZnO, antimoniures). Les courants de spin sont étudiés dans le cadre de la collaboration avec Stanford et figureront dans le programme de Spinaps (cf infra.). IBM finance également fortement la recherche académique sur l'informatique quantique.
- **Intel** considère que la spintronique est une option pour le futur au même titre que les autres technologies (électronique moléculaire, organique...). Deux ou trois personnes suivent le domaine en interne sur les courants de spin, le calcul quantique, les applications en logique. Il s'agit d'une activité de veille mais aussi de soutien à la recherche académique. L'objectif pour l'entreprise est d'être à même d'intégrer rapidement une technologie nouvelle pour avoir les processeurs les plus performants du marché.
- **HP** ne conduit plus de recherche directe en spintronique mais pourrait de nouveau s'y intéresser si apparaissaient des applications à faible consommation (courants de spin non dissipatifs de Stanford, auxquels UCSB ne croit pas), à haute fréquence, ou en calcul quantique. Un théoricien assure la veille.

* Les fabricants de mémoires sont, quant à eux, dans des phases de développements ou de commercialisation de MRAMs en particulier Motorola (non visité), et Cypress. L'objectif de ces mémoires magnétiques est de combiner la rapidité des SRAM, la densité des DRAM et le caractère non volatile des flash. En 2002, la branche semiconducteur de Motorola (devenu entre temps Freescale Semiconductor, Inc.) a réussi la mise au point d'une première MRAM à 1 Mo avec des cycles lecture/écriture de moins de 50ns. A la fin 2003, Motorola a été, à nouveau, le premier à lancer une MRAM à 4Mo. Des annonces sont attendues prochainement pour des mémoires à plus forte capacité, en particulier de la part de Cypress qui commercialise déjà des MRAMs à 64ko et à 256ko.

La réduction du temps nécessaire à l'écriture¹⁰ des données dans la mémoire et de la puissance consommée au cours de cette phase restent des objectifs à atteindre pour observer un vrai développement de la technologie des MRAM.

* En matière industrielle, l'étape suivante, après les MRAM, serait le développement de nouveaux types de composants à base de transistors de spin, d'interrupteurs, de filtres à spins ou de diodes magnétiques, utilisant des hétérostructures¹¹ combinant les matériaux magnétiques (stockage magnétique et contrôle des spins) aux semi-conducteurs (contrôle des signaux électriques voire optiques). L'objectif est d'intégrer ces nouveaux matériaux dans la filière technologique actuelle du silicium.

¹⁰ Par commutation de la cellule mémoire magnétique en appliquant un champ magnétique extérieur créé par des lignes de courant.

¹¹ La réalisation de structures hybrides est rendue difficile par la grande différence dans la densité des porteurs libres entre un métal et un semiconducteur. Ce qui ne permet pas d'injecter efficacement des spins d'un matériau à l'autre.

III – Stratégie et moyens :

1 – Les agences fédérales :

Les agences fédérales ont clairement affiché l'électronique du futur comme priorité et ont entrepris un effort sur le long terme qui s'inscrit dans le cadre de la National Nanotechnology Initiative (NNI¹²) et le soutien croissant aux projets «nanos».

La DARPA¹³ (Defense Advanced Research Project Agency), agence de recherche du ministère de la défense, considère le secteur de l'électronique comme stratégique tant sur le plan militaire qu'économique et a défini deux grands programmes cadres :

- **matériaux et électronique**, principalement pour le développement de nouveaux composants, doté d'environ 500 M\$ par an, et comprenant un sous-programme pour les technologies non silicium prévoyant entre autre le financement des projets en électronique moléculaire, sur l'informatique quantique, les semi-conducteurs à base d'antimoine... et un autre sous-programme sur les composants et les matériaux biologiques en particulier pour le financement des techniques de biofabrication.
- **électronique avancée**, plus orienté sur les nouvelles méthodes de fabrication, doté d'environ 200 M\$ par an. En particulier, le sous-programme sur la lithographie avancée pour des dimensions inférieures à 50nm (techniques sans masque qui s'arrêtera en 2006, nanoimprint, épitaxies...).

Pour le département de la défense, la spintronique¹⁴ présente un intérêt pour le développement de mémoires non volatiles et résistantes aux radiations et de composants pour les systèmes embarqués rapides, consommant peu et particulièrement robustes. En outre, la DARPA finance des programmes en spintronique pour la mise au point de capteurs magnétiques.

Budget de la DARPA pour le développement de l'électronique du futur (M\$)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Matériaux et électronique	414	465	502	486	495	496	496
Dont - technologies non silicium	80	83	61	34	28	16	16
- biomatériaux et composants	65	77	89	96	82	86	78
Electronique avancée	158	186	218	205	234	225	194
Dont -lithographie avancée	33	22	24	0	0	0	0

La NSF¹⁵ (National Science Foundation), principal financeur de la recherche fondamentale américaine, a défini un programme spécifique : NSE (**Nanoscale Science and Engineering**) doté en 2005 d'environ 305 M\$. Il permet de constituer dans les universités américaines des centres, les NSEC¹⁶ (Nanoscale Science and Engineering Centers), dédiés aux nanotechnologies et à vocation pluridisciplinaire. Des sous-programmes concernent directement la nanoélectronique pour 65 M\$ et les technologies de fabrication à l'échelle «nano» pour 14 M\$. La NSF finance les équipements et les formations à ces nouvelles technologies. En outre, l'agence fédère les universités et constitue le NNIN, un réseau de centres spécialisés équipés en salles blanches et en équipements accessibles à toute la communauté scientifique américaine. L'objectif est de pouvoir mettre à disposition des chercheurs tous les équipements nécessaires à leurs travaux.

¹² <http://www.nano.gov/>

¹³ <http://www.darpa.mil/>

¹⁴ La thématique est suivie par le service "Materials& devices / Functional Materials" de la DARPA: <http://www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/spintron.htm>

¹⁵ <http://www.nsf.gov/>

¹⁶ Fin 2004, 14 centres NSEC étaient financés par la NSF.

Budget de la NSF pour les nanotechnologies (Millions de \$)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Nanoscale Science and Engineering	150	192	222	254	305	315	325
Dont ingénierie (composants/fabrication)	Nc	Nc	94	109	134	Nc	Nc

Le **NIST** (National Institute of Standards and Technology) a créé une unité sur la métrologie des composants nanoélectroniques pour développer les méthodes de caractérisation, de tests et de mesures spécifiques à ces dimensions.

2 – Quelques exemples d'infrastructures universitaires

Le réseau NNIN¹⁷ (National Nanotechnology Infrastructure Network) constitué et financé par la NSF est un réseau de treize centres de recherches sur les nanotechnologies, avec spécialisations thématiques.

Les centres qui travailleront sur la nanoélectronique sont les suivants :

- Cornell University ;
- Stanford University ;
- University of Michigan-Ann Arbor ;
- Georgia Institute of Technology ;
- University of Texas-Austin ;
- North Carolina State University (lithographie) ;
- UC Santa Barbara.



Parmi ces centres, on peut citer le CIS¹⁸ (Center for Integrated Systems) de Stanford qui propose un partenariat entre l'université et les entreprises industrielles désireuses d'utiliser la salle blanche et ses équipements. En contrepartie, ces entreprises financent le centre et orientent les recherches qui y sont menées.

Un réseau de coopération est donc en train de se constituer sur le territoire américain, même si de nombreuses universités, et non des moindres (Caltech, MIT...), ne sont pas intégrés dans ces dispositifs financés directement par la NSF. Ce réseau est le pendant du réseau national des grandes plate-formes technologiques français, financé par le ministère de la recherche (communément appelé réseau RTB – Recherche Technologique de Base). Les modes opératoires sont similaires. Les travaux immobiliers sont conséquents, témoignage d'une vitalité économique importante.

¹⁷ <http://www.nnin.org>

¹⁸ <http://cis.stanford.edu/>

Le CNSI¹⁹ (California NanoSystems Institute) des universités de Californie à Santa Barbara et Los Angeles : A l'initiative de l'Etat de Californie, quatre instituts spécialisés viennent d'être créés pour favoriser les échanges inter-universitaires et les transferts de technologies vers les entreprises. Parmi ceux-ci, le CNSI est spécifiquement dédié aux nanotechnologies. Il est financé pour un tiers par l'état californien qui injectera 100 millions de dollars sur quatre ans. Le reste des financements émane du secteur privé. A UC Santa Barbara, le CNSI héberge en particulier le Center for Spintronics and Quantum Computation²⁰ dédié à la recherche, l'enseignement et la formation sur l'électronique de spin et à l'informatique quantique. Ce centre s'intègre dans un réseau plus vaste de coopération internationale avec d'autres centres universitaires et des entreprises.

L'université de Californie à Los Angeles héberge le FENA²¹ (Center on Functional Engineered Nano Architectonics) pour suivre les développements de l'électronique du futur au-delà du traditionnel CMOS.

Le FENA s'appuie sur un réseau d'une centaine de scientifiques à travers les Etats-Unis et est financé principalement par les associations d'industriels de l'électronique et le Département américain de la Défense. La spintronique et la logique magnétique sont, là encore, considérées comme une option sérieuse pour la mise au point de nouveaux types de composants.

3 - Les industriels

Les grands laboratoires industriels (Bell Labs, IBM...), qui ont permis les premières découvertes en électronique, s'impliquent désormais moins dans la recherche fondamentale (avec des applications à plus de dix ans). Ils sont soumis à une concurrence très forte et fonctionnent dans une **logique de retour sur investissement rapide**. Les effectifs des laboratoires ont ainsi été fortement réduits. La tendance est désormais **au partenariat fort avec le monde académique**.

Les industriels affirment qu'ils n'hésitent pas à collaborer entre eux (ou à partager une collaboration avec les universités) sans trop de souci du secret pour les programmes à long terme. C'est le cas par exemple de IBM qui travaille avec Stanford University, de HP avec les Sandia Labs ou encore de TI avec l'EPFL de Lausanne.

Les autres entreprises de semiconducteurs ne semblent conduire que des actions de développement pour la mise au point et les tests de nouveaux composants avant leur mise sur le marché. C'est notamment le cas d'Intel qui ne conduit pas directement de recherches fondamentales et mène plutôt des actions de veille et de financements d'équipes académiques pour des programmes de long terme. Des «résidents Intel», sont envoyés par l'entreprise dans différentes universités (deux à UCSB, un à UCLA). Du point de vue d'Intel, la spintronique reste une option pour le futur.

Le rôle des associations d'industriels est primordial pour coordonner les efforts de R&D. La SIA²² (Semiconductor Industry Association) et SEMATECH²³ établissent la roadmap et identifient les grands défis techniques, et la SRC²⁴ (Semiconductor Research Corporation) finance les programmes universitaires (600 M\$ en 20 ans). Un des objectifs de ces entreprises regroupées au sein d'associations est d'exercer un lobby auprès des autorités fédérales américaines pour qu'elles consacrent 100 millions de dollars supplémentaires par an au financement des développements de l'électronique.

¹⁹ <http://www.cnsi.ucla.edu/mainpage.html>

²⁰ <http://www.csqc.ucsb.edu/>

²¹ <http://www.fena.org/>

²² <http://www.sia-online.org/home.cfm>

²³ <http://www.sematech.org/>

Quelques exemples de travaux industriels et de partenariats :

IBM : Les recherches en physique du solide ont lieu principalement dans les centres de Zurich (Suisse) et d'Almaden (Californie). Elles portent sur l'informatique quantique, l'électronique moléculaire, la lithographie, la synthèse de matériaux diélectriques, le nanomagnétisme. IBM s'intéresse aux technologies de stockage des données et à la spintronique au sein de SPINAPS²⁵, laboratoire commun avec Stanford créé en 2004. Le laboratoire a donné lieu à un investissement initial de 7M\$, et tournera avec un budget annuel de 3/4M\$ employant une vingtaine de personnes. IBM souhaite bénéficier de l'environnement intellectuel de l'université. Les droits de propriété intellectuelle seront partagés. IBM paiera des royalties à Stanford pour exploiter un produit de la collaboration.

HP Labs : Une petite unité travaille sur les nanostructures. L'objectif est de définir de nouveaux composants en électronique moléculaire, à base de nanofils de silicium ou de germanium. Les travaux portent sur les technologies de nanoimprint et d'autoassemblage de structure inorganiques. La spintronique n'est suivie que sous les aspects théoriques. Profitant de la proximité géographique, HP a développé des contacts privilégiés avec Stanford University.

MARCO : Les associations et les consortiums d'industriels SIA, SEMI, SRC ont créé une organisation à but non lucratif MARCO (Microelectronics Advanced Research Corporation) pour financer, avec l'aide de la DARPA, des recherches académiques sur l'électronique du futur : 11 universités sont intégrées dans le dispositif. Les thèmes retenus sont : nanomatériaux atomiques et moléculaires, structures et matériaux ordonnés à une échelle nanométrique, simulation et calcul, nouveaux composants, architectures nanométriques.

4 - Partenariats entreprises/universités et propriété industrielle

Les centres universitaires apparaissent tous cofinancés par des fonds publics (fédéraux et locaux) et par des donations des entreprises. Le CNSI à UC Santa Barbara est de ce point de vue exemplaire. Les fonds publics initiaux ont eu un effet de levier permettant de lever plus du double en financements privés. Les donations peuvent être financières ou matérielles. Ainsi HP a complètement équipé le CNSI en matériel informatique. Les règles précises dans les interactions entre "académie" et "privé" dépendent de chaque université. Mais en général, ces interactions permettent aux industriels d'avoir accès aux installations universitaires et aux résultats des recherches qui y sont menées. Les scientifiques restent la plupart du temps maîtres de leurs travaux et de la possibilité de les publier librement. La répartition des droits de propriétés industriels, et des royalties possibles y afférent, dépend des contrats signés entre les parties. Ils peuvent selon les cas être partagés ou rester exclusivement à l'université ou à l'entreprise.

Concernant les très grandes entreprises disposant de laboratoires, la question du partage des droits de propriété intellectuelle avec les universités reste souvent le point le plus délicat de leurs partenariats avec le monde académique. En effet, les laboratoires industriels génèrent traditionnellement des revenus très importants sur les licences des brevets qu'ils détiennent (1,6 milliards de dollars de revenus dans le cas d'IBM).

Dans le cas des associations regroupant les industriels, les fonds sont mutualisés et redistribués en fonction des programmes de recherche académiques, donnant ainsi une grande souplesse dans les orientations thématiques à donner.

²⁵ <http://www.almaden.ibm.com/spinaps/>

ANNEXES

Centres de recherche et laboratoires académiques visités

1 - HARVARD - Robert Westerveld
NSEC
29 Oxford Street.
Cambridge, MA 02138
Web site : <http://nsec.harvard.edu>

- L'université d'Harvard accueille un NSEC (Nanoscale Science and Engineering Center) financé par la NSF. Ce centre fonctionne en collaboration avec d'autres universités et laboratoires américains : Le MIT, UC Santa Barbara, le Museum of Science de Boston et les laboratoires fédéraux de Brookhaven, Oak Ridge et Sandia National Lab. Au niveau international des collaborations sont établies avec la Delft University of Technology (Pays-Bas), l'University of Basel (Suisse), l'University of Tokyo (Japon). Le centre travaille sur des approches "top down" et "bottom up" pour la mise au point de nouveaux composants électroniques de taille nanométrique. Le centre a une vocation multiple de recherche, de transfert de technologie et d'éducation. Il dispose d'un budget de 2 M\$ permettant de financer une vingtaine d'étudiants dans les laboratoires de l'université et implique une trentaine de "senior scientists" auquel s'ajoute un budget d'équipement de l'ordre de 2 M\$/an.

Thème général : composants électroniques et magnétiques à l'échelle nano, comportant des phénomènes quantiques. Il y a relativement peu de recherches dans le domaine de la spintronique à l'exception des travaux du groupe de Charlie Marcus sur le thème "Pumping and focusing pure spins". Les étudiants suivent leurs échantillons sur les moyens du réseau. L'aspect "éducation" est assuré, en particulier via le Boston Museum of Sciences, des émissions sur New England Cable News, des cours (NSEC faculty lectures). Le NSEC finance 5 à 6 projets par an, sur avis de la part du "board of advisors" formé d'experts rémunérés extérieurs au NSEC. L'interaction avec les industriels se fait dans le cadre du "Industrial Outreach Program" avec notamment l'organisation d'un workshop annuel.

- L'université construit actuellement un nouveau bâtiment destiné à accueillir des équipes de tous horizons disciplinaires ainsi qu'une salle blanche de 2x1.000 ft² (plus de 200m²) : le Center for Imaging and Mesoscale Structures (CIMS). Le bâtiment est financé sur fonds propres de l'université grâce au don d'un particulier. Les équipements, d'un montant 20M\$, seront consacrés aux moyens d'élaboration, de nanofabrication, et d'imagerie (microscopie électronique). Les salles blanches prévues comprendront trois zones de classe 100, 1.000 et 10.000. Une équipe de 18 ingénieurs et techniciens, 3 post-docs et 8 visiting scientists est prévue pour la nouvelle installation.

2 – MIT : - Henry Smith
Nanostructures Lab
Dept of Electrical Engineering & Computer Science
77 Massachusetts Avenue Room 36-225
Cambridge, MA 02139 USA
Web site : <http://nanoweb.mit.edu>

Jagadeesh Moodera
Spin Electronics group
Francis Bitter Magnet Laboratory
MIT Room NW14-3102
170 Albany Street
Cambridge MA 02139-4307
Web site : <http://web.mit.edu/fbml/index.shtml>

Les activités de recherche présentées (nanolithographie, semiconducteurs magnétiques, jonctions tunnel magnétiques, ...) sont exactement dans les thématiques des laboratoires français. Les domaines les plus intéressants concernent :

- La nanolithographie utilisant l'auto-organisation de polymères dans des sillons ("grooves") circulaires développée dans le groupe de Caroline Ross. Cette technique pourrait être directement appliquée à l'enregistrement ultra-haute densité sur réseaux de plots, une approche qui a beaucoup été étudiée d'un point de vue fondamental il y a une dizaine d'années en France (IEF, Lab.L.Néel, IPCMS, LPS, CEA/DRECAM, CEA/DRFMC, ...) et en Europe (plusieurs réseaux européens, incluant des industriels comme Philips et Seagate) et qui est actuellement poursuivie dans une approche applicative à Spintec en collaboration avec Seagate ... entreprise américaine de la côte Est!
- Les semiconducteurs magnétiques, en tant que développement de matériaux (croissance et caractérisation). Ces travaux font écho à des efforts importants de part le monde, en particulier en France (équipe mixte CNRS/CEA, Lab. L.Néel, UMR CNRS/Thales, équipe mixte LPS/CEA, ...) et en Europe (plusieurs projets en cours). Le groupe de J. Moodera travaille sur ZnO:Mn et ITO:Mn, avec un comportement ferromagnétique pour l'instant inexplicé.
- Les études de transport dépendant du spin par mesure dans des jonctions tunnel métal/isolant/supraconducteur, comme outil de caractérisation de la polarisation en spin des systèmes étudiés. Le groupe de J.Moodera est un leader mondial dans le domaine. Il collabore avec plusieurs laboratoires en Europe et notamment en France avec l'équipe mixte ONERA/INSA Toulouse (J.F.Bobo).
- Le développement de matériaux adaptés à l'électronique de spin, tels qu'alliages à forte polarisation en spin, isolants magnétiques, multicouches aux interfaces contrôlées, etc... et leur intégration dans des structures fonctionnelles. Cette approche est également active en Europe et dans certains laboratoires nationaux (LPM Nancy, UMR CNRS/Thales, principalement).

Plus généralement, les activités du MIT semblent cadrer parfaitement avec celles développées en France, tant du point de vue du positionnement stratégique (à mi-chemin entre recherche amont et recherche appliquée) que du point de vue des thématiques. Les moyens dont disposent les équipes semblent très disparates mais nos interlocuteurs font le même constat sur la baisse des financements notamment industriels. Un des groupes visités (Smith) semble bien équipé et *in fine* pas très demandeur de collaborations extérieures. Un autre (Moodera) semble sortir d'un autre âge et est très proactif dans sa quête de contacts. Des projets collaboratifs avec le groupe de J. Moodera sont déjà en cours de discussion.

3 - Stanford University : Shoucheng Zhang
Department of physics and Applied physics
South Service Road , McCullough Bldg, Room 338
Stanford, CA 94305-4045
Web site : http://www.stanford.edu/dept/physics/people/faculty/zhang_shoucheng.html

Shoucheng Zhang est un théoricien. Ses travaux portent sur les courants de spins non dissipatifs à température ambiante. Ce travail serait prometteur en termes applicatifs... s'il s'avère que la théorie développée est correcte ce qui a été contesté par certains de nos autres interlocuteurs.

James Harris,
Department of Electrical Engineering,
Department of Materials Science & Engineering,
Department of Applied Physics
Stanford University
Paul G. Allen Center for Integrated Systems,
Web site : <http://www.ee.stanford.edu/~harris/>

Le laboratoire s'intéresse aux hétérostructures de semiconducteurs. Ses activités sur les semiconducteurs magnétiques sont en prise directe avec celles développées au Laboratoire L.Néel / Equipe mixte CNRS-CEA et à l'UMR CNRS/Thales (entre autres).

Exemples de matériaux étudiés :

- GaN et InN:Cr avec comportement ferromagnétique
- polarisation de l'émission d'un puits quantique comme mesure de la polarisation de spin

Stanford dispose d'une large salle blanche : le CIS (Center for Integrated Systems) accessible à des entreprises privées moyennant une participation financière.

Les Pr Zhang et Harris sont directement impliqués dans le partenariat avec IBM et le montage du centre **SPINAPS**. Stanford et IBM viennent de créer ce laboratoire commun sur la spintronique et les nanosciences. Doté initialement de 7M\$ et avec un budget annuel de l'ordre de 3/4M\$, le centre emploiera 10 à 15 personnes.

4 - UC Santa Barbara : James Allen
Center for Spintronics and Quantum Computation
California NanoScience Institute

David Awschalom
The Institute for Quantum Engineering, Science and Technology
(iQUEST)

4125 BROIDA HALL
University of California, Santa Barbara
Santa Barbara, CA 93106-4170

Website: <http://www.cnsi.ucla.edu/mainpage.html>
<http://www.csqc.ucsb.edu/>
<http://www.iquest.ucsb.edu>

L'Université de Californie à Santa Barbara va accueillir le California NanoSystems Institute (CNSI), institut créé à l'initiative de l'Etat Californien et dont l'objectif est de former des passerelles entre les laboratoires académiques et les entreprises de technologie. Le centre recevra 100 M\$ sur quatre ans de la part de l'Etat et a déjà levé le double en donations privées. Il est en cours de construction sur le campus. Le CNSI va héberger notamment :

- le Center for Spintronics and Quantum Computation qui travaille sur l'électronique de spin et l'informatique quantique
- l'Institute for Quantum Engineering, Science and Technology (iQUEST) où sont menées des recherches sur les systèmes complexes en particulier sur les nanostructures magnétiques

L'université dispose déjà de salles blanches bientôt complétées par les installations du CNSI. Des équipements d'élaboration (10 MBE, 5 MOCVD) et nanofabrication pour la matière dure existent déjà dans un seul bâtiment, avec un fonctionnement mutualisé. Pour l'ensemble, seulement un ingénieur et deux techniciens encadrent les doctorants (une centaine) qui ont reçu une formation (cours et TP) de six mois, et sont exclus dès la seconde erreur grave. L'utilisation par les doctorants est payante : 1000\$ de droit d'entrée annuel et 30\$ par heure, quel que soit l'équipement utilisé (même s'il a été apporté par son équipe); 90\$ pour les industriels.

Exemples de matériaux magnétiques étudiés :

- bulk ZnO avec des ions magnétiques ;
- GaMnAs et boîtes quantiques, deuxième bâti MBE (tout neuf) consacré à ce matériau (en plus du programme déjà bien établi de A. Gossard et D. Awschalom) ;
- modulateur optique 600GHz utilisant la dynamique de spin développé par un industriel en collaboration avec UCSB.
- activité théorique sur les matériaux multiferroïques

5 - California Institute of Technology :

Michael Roukes
Condensed Matter Physics
1200 E. California Blvd. MC 114-36
Pasadena, CA 91125
Web site : <http://www.its.caltech.edu/~nano/overview.html>

Le groupe de M. Roukes travaille sur les méthodes de fabrication et les caractérisations de composants et de systèmes nanométriques (NEMS). Dans le domaine magnétique, les travaux concernent :

- l'injection de spins,
- la dynamique des parois magnétiques dans les nanostructures de GaMnAs,
- la conception de NEMS pour la résonance magnétique et la détection de spins

Le laboratoire dispose de sa propre salle blanche. M. Roukes est aussi le directeur du nouveau Nanosciences Institute de Caltech qui est financé entièrement sur fonds privés.

6 – UCLA :

Kang L. Wang
Department of Electrical Engineering
66-147B Engr IV Box 951594
Los Angeles, CA 90095-1594
Website: <http://www.ee.ucla.edu/faculty/KWang.html>

UCLA a accueilli un nouveau centre en 2004, le FENA (Center on Functional Engineered Nano Architectonics) pour suivre les développements de l'électronique du futur au-delà du traditionnel CMOS. Le FENA est financé principalement par MARCO (associations d'industriels de l'électronique) et le Département américain de la Défense. FENA redistribue les fonds aux laboratoires universitaires impliqués dans un réseau constitué d'une centaine de scientifiques à travers les Etats-Unis. Il s'agit d'un "focused program": les industriels définissent les domaines qui les intéressent. Mais ils ne contrôlent pas directement l'utilisation des fonds. Les sociétés finançant MARCO-FENA n'ont pas l'exclusivité sur les résultats des recherches. Les universités subventionnées adhèrent au protocole défini par FENA et renoncent à leurs propres règles. FENA héberge un résident permanent d'Intel pour évaluer et orienter les recherches.

A UCLA, en matière de nanomagnétisme, les travaux portent sur la résonance du spin de groupes d'électrons (< 1000), la fabrication de transistors à résonance de spin, de détecteur et d'émetteur de photons individuels. Le spin nucléaire (temps de relaxation > 1 heure) est également étudié pour des applications de mémoires. Un programme complet (croissance, propriétés physiques, architecture...) est en cours sur un automate cellulaire basé sur le contrôle par les porteurs du ferromagnétisme induit dans des îlots de Ge:Mn dans le silicium.

7 - UC San Diego :

Mr. L. J. Sham
Diego Department of Physics 0319
9500 Gilman Drive, San Diego
Web site: <http://physics.ucsd.edu/~ljsst/ljs.html>
<http://www-physics.ucsd.edu/>

Les équipes de UC San Diego travaillent sur les semiconducteurs magnétiques et semiconducteurs organiques. Elles travaillent en partenariat avec le laboratoire fédéral de Los Alamos pour mener des expériences de diffusion de rayons X et de neutrons. En matière de spintronique, Sham travaille sur l'injection de spins polarisés. Il développe depuis deux ans un nouveau composant pour de nouvelles fonctions logiques : il utilise un milieu ferromagnétique (polysilicium contenant des particules de cobalt) pour former deux grilles dans un même transistor. Le matériau ferromagnétique polarise en spin le courant dans le semiconducteur : la densité de spin up ou down diffère selon l'orientation parallèle ou antiparallèle des deux grilles..

Entreprise visitées

1 - HP Labs : Quantum Science Research
Quantum Structures Research Initiative Department
3000 Hanover Street
Palo Alto, CA 94304-1185

HP a arrêté il y a quelques années son activité de recherche en nanomagnétisme, malgré la présence de quelques chercheurs ayant encore la compétence. HP pourrait de nouveau s'y intéresser si apparaissaient des applications à faible consommation (courants de spin non dissipatifs de Stanford), à haute fréquence, ou en calcul quantique. Un théoricien (A. Bratkovski) assure la veille et continue à publier des articles théoriques dans le domaine de la spintronique.

Les laboratoires de HP se focalisent aujourd'hui sur l'électronique moléculaire, les nanofils silicium et les technologies de la microélectronique. Un autre axe de recherche intéressant semble se situer dans la nanoimpression pour la fabrication de structures à l'échelle nanométrique. En France, cette activité concerne le LTM, le LPN et le LAAS.

2 - IBM : **Centre de recherche d'Almaden**
Stuart Parkin, Director of SPINAPS,
IBM-Stanford Spintronic Science & Applications Center
IBM Almaden Research Center
650 Harry Road, Almaden

Le centre de recherche fondamentale d'IBM, qui ne concerne maintenant plus la partie stockage de masse revendue à Hitachi, travaille très activement sur les MRAM, la logique magnétique reprogrammable, les technologies de nanofabrication et les études fondamentales de nanomagnétisme .

- L'activité MRAM est portée par S.Parkin, IBM fellow, pionnier de la spintronique US. Il est clairement orienté matériaux, avec un penchant pour la compréhension des mécanismes physiques de magnéto-transport. Le travail présenté sur les barrières de MgO intéresse tous les acteurs du domaine car c'est une des avancées majeures de l'année écoulée. Parallèlement, l'optimisation et la compréhension des phénomènes dans les jonctions tunnels magnétiques sont similaires à ce qui est fait dans plusieurs laboratoires français ... mais avec les moyens d'IBM. A noter la présence de nombreux français dans son équipe, et plus généralement sur le site (IBM+Hitachi) . Il semble que la formation des étudiants et jeunes chercheurs hexagonaux en magnétisme soit très appréciée outre-atlantique.
- L'activité nanofabrication est similaire à celle développée à HP labs. Il ne nous a pas été donné d'en savoir beaucoup plus.
- Idem pour l'activité sur la logique reprogrammable, qui semble être un sujet très " chaud " à IBM mais pour lequel peu a été dit. Il a été convenu entre les participants que nous essaierions de définir un cadre stratégique dans lequel des échanges pourraient avoir lieu. IBM semblait même extrêmement intéressé à participer à des projets européens et/ou nationaux dans ce domaine.
- Les études fondamentales en nanomagnétisme, qui montrent par exemple qu'il est possible de mesurer un spin nucléaire unique, sont extraordinaires mais nécessitent des moyens importants et seront difficilement reproductibles

Globalement, le centre d'IBM-Almaden reste malgré la scission avec Hitachi un formidable outil de recherche dont les activités sont à la pointe. Les travaux menés s'appuient sur des chercheurs de renommée mondiale (S. Parkin, D. Eigler, D. Rugar,..) avec des financements qui semblent confortables. Néanmoins, la philosophie " autarcique " d'IBM semble toujours d'actualité et les collaborations difficiles à mettre en musique par delà les déclarations de bonnes intentions.

- Déménagement envisagé par IBM (après le départ programmé pour les prochains mois d'Hitachi qui partageait les bâtiments ces dernières années, en évitant soigneusement de mélanger les personnels);

- Mise en place d'un laboratoire commun "Spinaps" entre IBM (10 à 15 personnes) et Stanford (les chercheurs d'IBM pensent alors pouvoir bénéficier des programmes destinés à la recherche académique); il repose sur des collaborations déjà bien établies (on retrouve les doctorants de Stanford dans les locaux d'IBM).

3 – Cypress 3901 North First Street,
San Jose, CA 95134, US
Web site : <http://www.cypress.com/portal/server.pt>

L'activité de Cypress dans le domaine des MRAM nous a été présentée par K. Ounadjela. Cypress s'intéresse aux MRAM pour s'attaquer aux marchés des SRAM et à une partie du marché des mémoires flash, pour un montant total estimé à 250M\$. Des MRAM à 64ko et à 256ko sont déjà en production au sein de Cypress.

Cypress travaille au développement de nouvelles MRAM à 4Mo. Ses équipes comptent 30 personnes sur le sujet. Les travaux portent sur l'amélioration du yield (taux de puces bonnes sur un même wafer). Ce taux doit être supérieur à 70/80% pour pouvoir passer en production. La fabrication des MRAM comprend environ 110 procédés différents dont 85 sont identiques aux procédés traditionnels du CMOS. Les 25 étapes propres à la fabrication de la jonction tunnel se font actuellement en 5 jours dans le laboratoire californien. Les étapes " CMOS " se font dans l'usine de production du groupe au Minnesota et l'assemblage final aux Philippines.

La taille actuelle des MRAM est de $2\mu\text{m}^2$ (taille du dot magnétique de $0.32\mu\text{m}^2$) à comparer aux $0,09\mu\text{m}^2$ des DRAM, la " jonction tunnel " étant le facteur limitant pour réduire la taille du composant.
