



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

4101 Reservoir Road, NW, Washington DC 20007

Tél. : +1 202 944 6249

Fax : +1 202 944 6219

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

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

<b>Domaine</b>	: Nanotechnologies
<b>Document</b>	: Rapport de mission
<b>Titre</b>	: Centrales de Nanotechnologies du Réseau NNIN : Centrales du Nord-Est des Etats-Unis
<b>Auteur(s)</b>	: Alain Cappy, Alain Fontaine, Michel de Labachellerie, Roland Hérino, Jean-Yves Marzin, Engin Molva, Jean-Louis Sanchez, Didier Théron
<b>Date</b>	: 25 août 2008
<b>Contact SST</b>	: Roland Herino <a href="mailto:attaché-phys.mst@consulfrance-houston.org">attaché-phys.mst@consulfrance-houston.org</a>
<b>Numéro</b>	:

<b>Mots-clefs</b>	: Nanotechnologies – Centrales technologiques
<b>Résumé</b>	<p><i>Du 15 au 20 juin 2008, un groupe de Directeurs de Recherches du CNRS et du CEA chargés de développer les Nanotechnologies en France, a visité aux Etats-Unis plusieurs sites importants de nanofabrication mis en place par le gouvernement fédéral pour offrir à la communauté scientifique des moyens technologiques performants. L'objectif était d'analyser les modèles de fonctionnement adoptés pour ces centrales, et de les confronter à ceux qui sont utilisés en France.</i></p> <p><i>Dans ce rapport, on présente tout d'abord le contexte de ces visites et on en dresse le bilan global, pour ensuite dans une deuxième partie décrire plus en détail et site par site les caractéristiques des plateformes technologiques visitées. Dans la conclusion, on dégage les points essentiels du mode de fonctionnement américain qui pourraient être utiles au développement du réseau français.</i></p>

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

## Mission

# "Centrales de Nanotechnologies du Réseau NNIN Centrales du Nord-Est des Etats-Unis"

16 – 20 juin 2008

## Rapport de mission

### *Résumé*

Du 15 au 20 juin 2008, un groupe de Directeurs de Recherches du CNRS et du CEA chargés de développer les Nanotechnologies en France, a visité aux Etats-Unis plusieurs sites importants de nanofabrication mis en place par le gouvernement fédéral pour offrir à la communauté scientifique des moyens technologiques performants. L'objectif était d'analyser les modèles de fonctionnement adoptés pour ces centrales, et de les confronter à ceux qui sont utilisés en France. Dans ce rapport, on présente tout d'abord le contexte de ces visites et on en dresse le bilan global, pour ensuite dans une deuxième partie décrire plus en détail et site par site les caractéristiques des plateformes technologiques visitées. Dans la conclusion, on dégage les points essentiels du mode de fonctionnement américain qui pourraient être utiles au développement du réseau français.

### *Visiteurs*

**Alain CAPPY**, Directeur de l'Institut d'électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) – Lille

**Alain FONTAINE**, Directeur du Programme C'Nano du CNRS et Directeur de l'Institut Louis Néel – Grenoble

**Michel de LABACHELERIE**, Directeur de Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique-Sciences et Technologies (FEMTO-ST) – Besançon

**Jean-Yves MARZIN**, Directeur du Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN) – Marcoussis

**Engin MOLVA**, Directeur de l'Institut Nanosciences et Cryogénie du CEA et Directeur adjoint de la Fédération Micro et nano Technologie (FMNT) de Grenoble

**Jean-Louis SANCHEZ**, Directeur adjoint du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS), Toulouse

**Didier THERON**, Coordinateur du réseau RENATECH des grandes centrales de technologies au CNRS

### *Organisation et accompagnement*

**Roland HERINO**, Attaché pour la Science et la Technologie, en charge du secteur Nanosciences et nanotechnologies, en poste au Consulat Général de Houston.

**Delphine TESSIER**, Volontaire Internationale au Bureau du CNRS à l'Ambassade de France, et représentante de son directeur Patrick BERNIER

# Table des matières

<b>A.</b>	<b>CONTEXTE ET PRINCIPALES CONCLUSIONS DE LA MISSION.....</b>	<b>3</b>
	<i>A.1 – Une visite stratégique.....</i>	<i>3</i>
	<i>A.2 – Des sites renommés et exemplaires.....</i>	<i>3</i>
	<i>A.3 – Un accueil chaleureux et des perspectives de collaboration.....</i>	<i>4</i>
	<i>A.4 – Introduction sur les centrales de nanotechnologies américaines.....</i>	<i>4</i>
	<i>A.5 – Généralités sur le fonctionnement des centrales de nanotechnologies américaines.....</i>	<i>5</i>
	<i>A.6 – Commentaires sur les sites visités.....</i>	<i>7</i>
	<i>A.7 – Conclusion.....</i>	<i>8</i>
<b>B.</b>	<b>DESCRIPTION SITE PAR SITE.....</b>	<b>9</b>
	<b><i>B.1 – CENTER FOR NANOSCALE SYSTEMS (CNS) - Harvard .....</i></b>	<b><i>9</i></b>
	<i>B.1.a Présentation.....</i>	<i>9</i>
	<i>B.1.b Equipements.....</i>	<i>9</i>
	<i>B.1.c Utilisation.....</i>	<i>10</i>
	<i>B.1.d Coûts.....</i>	<i>11</i>
	<i>B.1.e Quelques remarques.....</i>	<i>11</i>
	<b><i>B.2 – COLLEGE OF NANOSCALE SCIENCE &amp; ENGINEERING (CSNE) – Albany (New York).....</i></b>	<b><i>12</i></b>
	<i>B.2.a Présentation.....</i>	<i>12</i>
	<i>B.2.b Visite.....</i>	<i>12</i>
	<i>B.2.c Présentation de Michael FANCHER, Vice President for Economic Outreach and Business.....</i>	<i>13</i>
	<i>B.2.d Présentation de Pradeep HALDAR : activités dans le domaine de l'énergie.....</i>	<i>15</i>
	<i>B.2.e Présentation de James CASTRACANE : activités sur les Microsystèmes et les Dispositifs Biomédicaux.....</i>	<i>16</i>
	<i>B.2.f Propriété intellectuelle.....</i>	<i>17</i>
	<b><i>B.3 – CORNELL NANOSCALE SCIENCE &amp; TECHNOLOGY FACILITY (CNF) – Ithaca (New York).....</i></b>	<b><i>18</i></b>
	<i>B.3.a Présentation du "National Nanotechnology Infrastructure Network" (NNIN) – Exposé de Sandip TIWARI.....</i>	<i>18</i>
	<i>B.3.b Présentation du "Cornell Nanoscience Facility" (CNF) – Exposé de George MALLARIAS.....</i>	<i>19</i>
	<b><i>B.4 – PENN STATE UNIVERSITY , NANOFABRICATION FACILITY – University Park (Pennsylvanie)..</i></b>	<b><i>22</i></b>
	<i>B.4.a L'université de PENN STATE.....</i>	<i>22</i>
	<i>B.4.b Le Materials Research Institute (MRI).....</i>	<i>22</i>
	<i>B.4.c Présentation de Theresa Mayer: le Materials Research Institute (MRI).....</i>	<i>23</i>
	<i>B.4.d Ressources matérielles et humaines.....</i>	<i>24</i>
	<i>B.4.e Fonctionnement.....</i>	<i>24</i>
	<i>B.4.f Présentation de Paul WEISS : les défis en recherche sur les matériaux à l'échelle nanométrique.....</i>	<i>25</i>
	<i>B.4.g Présentation de Suman DATTA : The "Green Transistor" Era.....</i>	<i>25</i>
	<i>B.4.h Présentation de Niitin SAMARTH : Spintronique avec des nanostructures à semiconducteur.....</i>	<i>26</i>
	<b><i>B.5 – Center for Nanoscale Science &amp; Technology (CNST) : Campus du National Institute of Standards and Technology (NIST) de Gaithersburg (Maryland).....</i></b>	<b><i>26</i></b>
	<i>B.5.a Présentation générale du NIST: exposé de Claire M. Sundry, Directrice des relations Internationales.....</i>	<i>26</i>
	<i>B.5.b Présentation du CNST: exposé de Robert CELOTTA, Directeur.....</i>	<i>28</i>
	<i>B.5.c Le CNST Nanofab.....</i>	<i>28</i>
	<i>B.5.d Exposé de Henri LEZEC : exemples de recherche en nano plasmonique.....</i>	<i>29</i>
	<i>B.5.e Exposé de Matthew Mc MAHON : Orthogonal tracking microscopy for nanofabrication research.....</i>	<i>29</i>
	<i>B.5.f Exposé de Marc STILES : Condensed matter theory.....</i>	<i>30</i>
	<i>B.5.g Visite d'un STM basse température.....</i>	<i>30</i>
	<i>B.5.h Visite des travaux d'optique atomique pour réaliser des sources d'ions par voie optique.....</i>	<i>30</i>
<b>C.</b>	<b>CONCLUSION GENERALE ET COMMENTAIRES.....</b>	<b>31</b>

## **A. CONTEXTE ET PRINCIPALES CONCLUSIONS DE LA MISSION**

### **A.1 – Une visite stratégique**

La maîtrise de la fabrication et de la caractérisation des nano objets et nano matériaux est un élément clé indispensable au développement des nanotechnologies, mais qui nécessite des équipements importants trop coûteux pour être acquis et pris en charge par des universités ou des centres de recherche isolés : ils doivent donc être centralisés et mutualisés. Les pays développés comme la France et les Etats-Unis ont mis en place des réseaux de centrales technologiques équipées avec des machines et des moyens de caractérisation ultrasophistiqués, placés dans un environnement contrôlé, et mis à disposition de la communauté scientifique pour l'aider à mener ses projets de recherche et développement.

Aux Etats-Unis, il y a d'une part le réseau NNIN (National Nanotechnology Initiative Network) développé et soutenu par la NSF et qui regroupe 13 centres répartis sur l'ensemble du territoire, d'autre part les 5 centres mis en place et financés par le *Department of Energy*, complétés par les moyens fournis par le *Department of Defense*, la NASA ou encore le *National Institute of Standards and Technology*.

En France, un réseau de "Grandes Centrales" a été mis en place à partir de 2003 sous l'égide de la Direction de la technologie du Ministère de la recherche, en associant le CNRS et le CEA. Depuis, un autre réseau de centrales de moindre importance, dites de proximité est venu compléter le dispositif.

Le fonctionnement et la coordination de ces moyens technologiques soulèvent de nombreuses questions relatives aux investissements nouveaux, à leur répartition, à la prise en charge des coûts de fonctionnement, au personnel d'encadrement et de maintenance, etc.

C'est dans ce contexte que la Mission pour la Science et la Technologie a proposé aux responsables des grandes centrales françaises de visiter quelques sites aux Etats-Unis afin de leur permettre d'analyser les modèles de fonctionnement adoptés par leurs collègues américains et d'en tirer les enseignements appropriés pour optimiser notre propre dispositif.

### **A.2 – Des sites renommés et exemplaires**

La délégation française était constituée des directeurs des "Grandes Centrales " françaises de Lille, Marcoussis, Besançon, Grenoble et Toulouse, du responsable du programme national "C'Nano" et du coordinateur du réseau des centrales pour le CNRS (RENATECH). Le groupe était accompagné par l'attaché scientifique du poste de Houston, et par la représentante du Directeur du bureau du CNRS à Washington (empêché pour raison de santé).

La mission, organisée par l'attaché scientifique du poste de Houston en charge des Nanotechnologies, a permis de visiter successivement les centres de Harvard University (Massachusetts), Albany University (Etat de New York), Cornell University (Etat de New York), Penn State University (Pennsylvanie) et celui du National Institute of Standards and Technology (NIST – Maryland).

L'objectif commun à ces centrales est de permettre à diverses communautés d'accéder à des ressources technologiques sophistiquées et onéreuses. Même si ce n'est pas explicite, la composante "aménagement du territoire" est bien présente.

Comme en Europe, deux échelles de taille émergent dans ce paysage :

- d'un côté la centrale d'Albany, qui bien qu'adossée à une université est proche dans ses objectifs de l'IMEC (Centre de Microélectronique de Louvain, Belgique) ou du CEA-LETI (Grenoble) ;

- de l'autre les centrales académiques du NNIN (Harvard, Cornell, Penn State) et celle du NIST focalisées sur la recherche fondamentale.

Les investissements et les surfaces de salles blanches d'Albany paraissent démesurés, mais les centrales du second groupe ressemblent, en termes d'équipements et de surface, aux grandes centrales françaises : des salles blanches de 700 à 1500 m<sup>2</sup> où l'accent est mis sur l'interdisciplinarité et les nouvelles thématiques, de 10 à 20 permanents, des équipements permettant de traiter des échantillons de tailles variables allant jusqu'à 100 ou 150 mm.

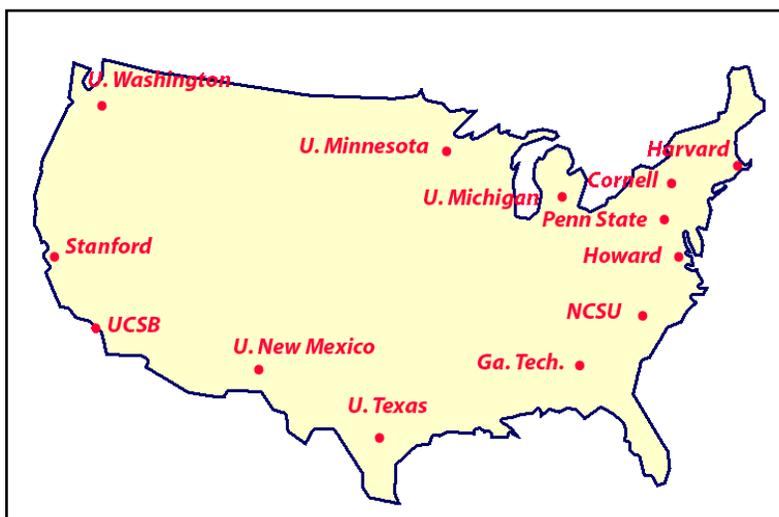
### **A.3 – Un accueil chaleureux et des perspectives de collaboration**

Dans chacun des sites, la délégation française a été reçue chaleureusement et avec beaucoup d'intérêt. Plusieurs exposés précédaient les visites des installations, et porté à la fois sur le fonctionnement des centrales et sur les principales thématiques de recherche développées. L'organisation des centrales françaises et les différents programmes de recherche en nanosciences et nanotechnologies en France était aussi présentés à chaque fois à nos collègues américains, permettant ainsi des échanges réciproques particulièrement ouverts et intéressants.

### **A.4 – Introduction sur les centrales de nanotechnologies américaines**

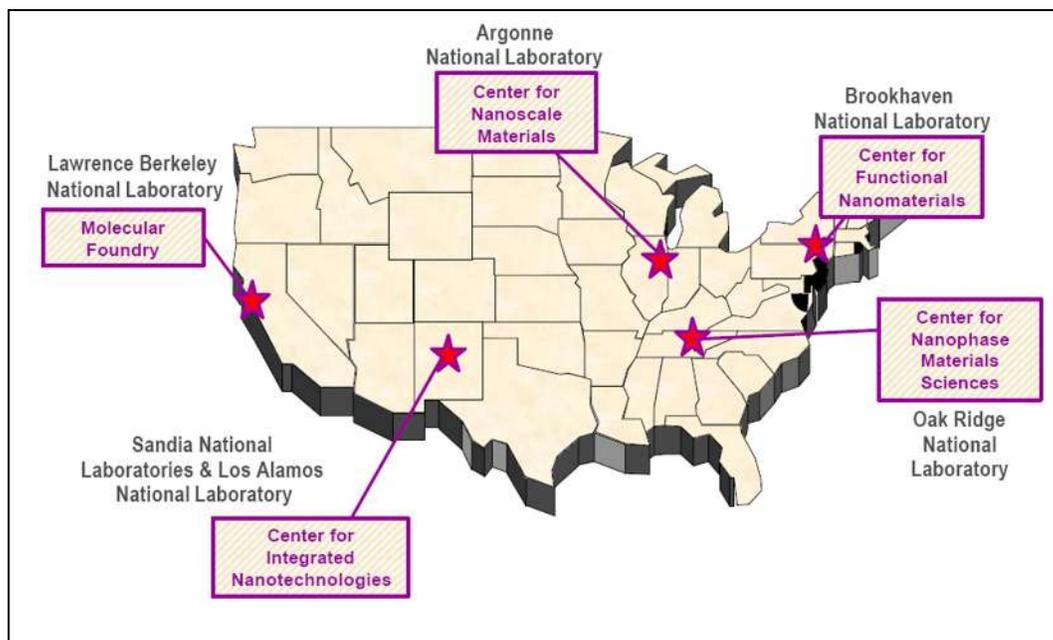
Certaines centrales du réseau américain existent depuis plusieurs décennies. Toutefois, avec la National Nanotechnology Initiative<sup>1</sup>, programme mis en place en 2001 par le gouvernement fédéral pour coordonner la recherche en nanotechnologies, les Etats-Unis ont investi massivement dans ce secteur et structuré en réseaux ces infrastructures. Dix pour cent des fonds de la NNI, soit environ de 70 à 100 M\$ par an sont consacrés aux infrastructures (dont ces centrales). Ces fonds fédéraux sont complétés par les investissements massifs des états, des universités qui hébergent ces centres et des industriels.

La plupart des moyens lourds de technologie sont désormais regroupés dans des grandes centrales implantées majoritairement sur les campus universitaires, dans des bâtiments récents (et architecturalement intéressants). La NSF pilote le réseau NNIN (créé en 2004), d'abord initié autour des centrales historiques (Stanford, Cornell..), qui s'est élargi progressivement à treize centres répartis sur l'ensemble du territoire (voir la carte ci-dessous).



<sup>1</sup> Pour un rapport détaillé sur la NNI, lire "La politique de R&D en nanotechnologies aux Etats-Unis", à télécharger gratuitement sur le site [http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05\\_029.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_029.htm)

Toujours dans le cadre de la NNI, le Department of Energy (DoE) a lui aussi développé un réseau de cinq "user facilities" pour les nanosciences, les Nanoscale Science Research Centers (NSRCs), dont les implantations sont celles des laboratoires nationaux associés aux DOE (carte ci-dessous). Il faut également citer l'investissement important du Department of Commerce (DoC) qui vient de doter le National Institute of Standards and Technology (NIST) d'un Center for Nanoscale Science and Technology sur le campus de Gaithersburg, à proximité de la capitale, et qui compte lui aussi un centre de nanofabrication et caractérisation, Nanofab, ouvert aux scientifiques extérieurs à l'agence. La mission a visité 5 de ces centres à Harvard, Cornell, Albany (College of Nanoscale Science and Engineering), Penn State et celui du NIST.



### **A.5 – Généralités sur le fonctionnement des centrales de nanotechnologies américaines.**

L'objectif commun à ces centrales est de permettre à diverses communautés d'accéder à des ressources technologiques performantes et onéreuses. Même si ce n'est pas explicite, la composante "aménagement du territoire" est bien présente.

Comme en Europe, suivant les thèmes traités, deux échelles de taille émergent dans ce paysage : la centrale du CNSE d'Albany, d'un côté, qui bien qu'adossée à une université est proche dans ses objectifs de l'IMEC (Louvain, Belgique) ou du LETI (CEA Grenoble) ; de l'autre les centrales académiques du NNIN (Stanford, Cornell, Penn State, UCLA, UCSB...), les NSRCs du DoE (Berkeley par exemple) et celle du DoC (NIST). Si, pour la première, les équipements ainsi que les surfaces de salles blanches sont assez démesurés, les secondes ressemblent, en termes d'équipements et de surface, aux grandes centrales françaises (de 700 à 1500 m<sup>2</sup> de salles blanches, de 10 à 20 permanents, des wafers allant du morceau de plaque jusqu'à 4 ou 6 pouces, une emphase mise sur l'interdisciplinarité et les nouvelles thématiques.).

Le modèle du College of Nanoscale Science and Engineering (CNSE) d'Albany fait l'objet de la partie B-2 du présent document : ce site est essentiellement centré sur la microélectronique et ses enjeux industriels (pour les fabricants de circuits comme pour les équipementiers), et l'équilibre recherche / développement penche très largement du côté du développement. Pour ce qui est des centrales de type académique, deux modèles de

fonctionnement coexistent : le modèle NNIN et le modèle NSRC.

### **Modèle NNIN**

Ce modèle est adopté par la plupart des universités (mais aussi par le NIST). Les centrales reposent sur un parc d'équipements et un personnel permanent dont les deux principales missions sont de maintenir les équipements et de former les utilisateurs. Voici les principales caractéristiques de leur fonctionnement :

#### **Accès**

- Les équipements sont ouverts à une vaste communauté d'utilisateurs, qu'ils soient académiques ou industriels, moyennant une formation appropriée. Le taux d'ouverture peut varier d'un centre à l'autre, mais il est toujours inférieur à 50% ;.
- La majorité des projets sont conduits par les utilisateurs de la centrale, avec la possibilité, pour les projets les plus simples, qu'ils soient conduits par les permanents de la centrale ;
- Il n'y a pas de sélection sur les projets conduits proposés (ceux-ci étant en général évalués par une agence fédérale lors de la demande de financement) et l'accès aux équipements se fait sur la base du « premier arrivé premier servi » (toutefois, on ne peut réserver un équipement que dans le mois suivant la demande, avec un maximum dans le temps d'utilisation maximum, pour qu'un utilisateur ne puisse pas saturer le système) ;
- Tous les utilisateurs (internes à l'université, externes, industriels) sont traités sur un pied d'égalité (en prenant en compte les contraintes des extérieurs) pour l'accès aux installations ;
- Les centrales sont ouvertes 24h sur 24, 365 jours par an (la disponibilité des équipements faisant partie des critères de labellisation par le NNIN), cependant les permanents font des horaires normaux. Seule la centrale du NIST fait exception (12 heures / jour et 5 jours / semaine), mais c'est une centrale qui n'a pas encore atteint son régime permanent ;
- Toutes les centrales sont sous vidéo surveillance, d'abord pour des raisons de sécurité (analyse des incidents/accidents), mais aussi pour "inciter fortement" à la discipline nécessaire dans les comportements, voire pour identifier les responsabilités en cas de dégradation d'équipements.

#### **Tarifcation :**

L'accès est facturé sur la base des horaires et des opérations élémentaires effectuées. Les coûts peuvent varier d'une centrale à l'autre, et le tarif appliqué dépend du type d'utilisateur (les académiques sont facturés au coût marginal, incluant le salaire des permanents, et les industriels sont facturés au coût du marché).

Pour les utilisateurs académiques, les tarifs sont très faibles. Il est à noter de ce point de vue que :

- Les "profits" faits sur les accès d'industriels sont réinjectés afin de diminuer les coûts pour les académiques (et ne pas faire de bénéfices) ;
- Les subventions publiques sont également prises en compte : les utilisateurs académiques ne payent que le surcoût hors subvention ;
- Aucun amortissement des équipements n'est facturé dans les coûts d'accès. Ce dernier point est lié au système américain : les professeurs financent sur leurs contrats l'implantation des nouveaux équipements (moyennant en contre partie un accès privilégié pendant quelques années). Il y a également beaucoup de donations, et quelques équipements financés directement par la NSF,
- Particularité du NIST : les coûts sont plus faibles pour les projets dans le domaine de la mesure et des développements technologiques.
- Les problèmes de propriété intellectuelle (PI) sont traités de façon simple : aucun des permanents n'est autorisé à signer un non-disclosure agreement (NDA), ou accord de confidentialité. Ce qui leur est dit (y

compris en ce qui concerne les nouveaux procédés) est mis à la disposition des autres utilisateurs : la PI est partagée s'ils participent aux développements ;

- Les permanents ne développent pas de procédés, mais mettent éventuellement en contact les utilisateurs ayant des objectifs technologiques communs ;
- Les nouveaux équipements sont choisis en fonction des souhaits des utilisateurs ;
- Le temps d'accès est court (seul un descriptif de 2 pages est demandé pour vérifier la faisabilité et la compatibilité de l'action envisagée avec les ressources de la centrale), il faut ensuite seulement compter le temps de formation ;
- La formation se compose d'un ensemble de modules incluant la conduite en salle blanche, la sécurité, et l'utilisation des équipements. Sa durée dépend de la nature des équipements à utiliser et se termine par un test pratique.
- Des missions complémentaires sont rattachées au NNIN comme l'organisation de workshops ou la formation des étudiants de master.

### **Modèle NSRC (Department of Energy)**

Ce modèle est analogue à celui des grands instruments type ESRF : la centrale est intégrée à un laboratoire, et les utilisateurs (externes comme internes au laboratoire) y accèdent à titre gratuit, après une sélection par un comité de projet externe, basée sur l'excellence du projet scientifique. Les chercheurs du laboratoire doivent la moitié de leur temps pour mener à bien les projets sélectionnés (avec les utilisateurs externes s'ils sont présents, ou bien seuls pour les projets simples).

### ***A.6 – Commentaires sur les sites visités.***

#### **CENTER FOR NANOSCALE SYSTEMS – HARVARD UNIVERSITY (CAMBRIDGE) :**

Le bâtiment qui abrite le Centre de Nanotechnologies de Harvard est très récent. Le centre a été très bien doté par l'université qui est manifestement riche. Il est surtout spécialisé dans les techniques de caractérisation, qui constituent la grande partie de son expertise. On peut citer en particulier la mise au point d'un Microscope à ions Hélium qui semble donner des résultats intéressants en imagerie à l'échelle nanométrique. Le groupe a envie d'être reconnu, et manifeste un grand intérêt pour travailler avec des étrangers.

#### **COLLEGE OF NANOSCALE SCIENCE & ENGINEERING – UNIVERSITY OF ALBANY (ALBANY) :**

Le Centre de Nanotechnologies d'Albany est très fortement orienté vers le développement industriel, avec des investissements colossaux qui proviennent des nombreuses entreprises partenaires du centre (plus de 2 milliards de dollars ont déjà été investis). On note cependant que les moyens de caractérisation, de modélisation et de simulation semblent sous-dimensionnés par rapport aux énormes moyens de microfabrication que possède le centre : pour ces aspects, le centre compte probablement sur des collaborations extérieures. Ce centre est propriété de l'état, et son but principal est de mettre des industriels en relation afin d'augmenter leur compétitivité en associant un problème avec une solution. C'est un modèle très intéressant (bien que culturellement difficile à accepter pour des universités françaises), dans lequel c'est une université qui se charge de la coordination et de la mutualisation d'investissements industriels, et qui régule les questions de concurrence entre les entreprises, sur un domaine hautement technologique. L'université accueille de nombreux industriels plus ou moins complémentaires (fabricants de circuits, équipementiers, etc.), ou bien concurrents, et en assume les conséquences en matière de gestion de la propriété intellectuelle. Les industriels se pressent pour venir à Albany et l'université doit effectuer une sélection. Ces investissements ne servent cependant que des projets à relativement court terme : la recherche à long terme semble faiblement représentée sur ce site.

#### **CORNELL NANOSCALE SCIENCE & TECHNOLOGY FACILITY – CORNELL UNIVERSITY (ITHACA) :**

Le CNF est le prototype du modèle américain de gestion des centrales de technologie universitaires. Il a une expérience de plus de 30 ans dans le domaine et a su mettre au point un système flexible et efficace avec peu de personnel permanent. La grande force du système est la formation et la responsabilisation des utilisateurs. Après le système populaire dans les années 1990 du MCNC ou de Sandia National Laboratories (qui offrait un service de microfabrication réalisé par des équipes spécialisées), c'est maintenant l'intervention directe des utilisateurs qui est privilégiée, ce qui a un effet de levier énorme sur la formation générale des entreprises américaines aux nanotechnologies. De façon générale, un véritable continuum formation - recherche - innovation est favorisé. Il est frappant de constater qu'aux Etats-Unis un nombre énorme de personnes sont formées aux bases des nanotechnologies : chaque année, plus de 1600 nouveaux utilisateurs suivent ainsi une formation dans une des centrales du réseau NNIN. Avec un tel système, toutes les PME des USA pourront tirer parti des nanotechnologies sans aucune inhibition pour ce domaine, et en sachant utiliser de manière libre et autonome des infrastructures de très haut niveau.

#### **NANOFABRICATION FACILITY - PENN STATE UNIVERSITY (STATE COLLEGE) :**

Le Material Research Institute de Penn State University est un centre spécialisé dans les matériaux spéciaux. Il a une stratégie de niche et mise sur le développement d'oxydes complexes (ferroélectriques en particulier), ainsi que le développement de techniques de lithographie à l'échelle nanométrique en utilisant des techniques d'auto assemblage de matériaux moléculaires. En fait, l'équipement de la centrale reflète peu ce positionnement particulier car il reste très généraliste (seuls quelques équipements spécifiques sont dédiés à cette stratégie). Ce centre fait partie du NNIN et a manifestement les mêmes règles de fonctionnement que le CNF, bien que le taux d'occupation de la centrale semble plus faible. Il semble également globalement moins bien doté que ceux hébergés par des universités privées, néanmoins une nouvelle salle blanche va y être construite prochainement.

#### **CENTER FOR NANOSCALE SCIENCE & TECHNOLOGY (CNST) – NIST (GAITHERSBURG) :**

Sous l'impulsion de l'administration fédérale, le NIST s'est doté à Gaithersburg d'un laboratoire entièrement dédié aux nanotechnologies, et d'une centrale de technologie récente qu'il a organisée suivant le modèle du NNIN bien qu'elle ne fonctionne pas en 24/24 et 7/7 et que l'activité n'y semble pas aussi intense. Les programmes de recherche du CNST ne semblent cependant pas très spécifiques d'applications à la métrologie. Cette centrale est encore en cours d'achèvement, mais elle est déjà très raisonnablement dotée comme l'ensemble des centrales que nous avons visitées.

A la suite de nos visites et des discussions que nous avons menées avec nos hôtes américains, il apparaît qu'il y a un intérêt commun à développer des interactions entre les responsables et les personnels de recherche impliqués dans le fonctionnement de ces centrales, focalisées sur les nanotechnologies dans les deux pays. La possibilité d'une visite retour de responsables américains en France a été évoquée, ainsi que l'organisation de séjours de courte durée pour des scientifiques et des ingénieurs rattachés à ces plateformes technologiques. Ces interactions pourraient s'appuyer sur un accord de coopération focalisé sur les réseaux technologiques en nanosciences qui serait signé entre le CNRS et la NSF et qui représenterait ainsi une conclusion importante de cette mission.

#### **A.7 – Conclusion.**

Cette visite a été une excellente opportunité d'améliorer notre connaissance et notre compréhension des réseaux technologiques mis en place aux Etats-Unis pour accompagner le développement des nanotechnologies. Même si les sites américains présentent plusieurs caractéristiques semblables à ceux du réseau français, des différences notables ont été mises en évidence, aussi bien sur la disponibilité des équipements et leur ouverture, que sur la gestion des projets et le financement des centrales. Les échanges réciproques approfondis qui ont caractérisé ces visites permettent d'envisager des interactions plus étroites qui devraient conduire à des échanges de scientifiques et d'ingénieurs entre différents sites.

## **B. DESCRIPTION SITE PAR SITE**

### ***B.1 – CENTER FOR NANOSCALE SYSTEMS (CNS) - Harvard***

Visite préparée et accompagnée par Eric MARTIN

#### **B.1.a Présentation**

Harvard (18000 étudiants) est la plus ancienne université des Etats-Unis (fondée en 1636) et son campus principal est à Cambridge. Un second campus est en cours de construction à Boston. Le CNS (Center for Nanoscale Systems) a été fondé en 1999. C'est un centre qui fournit un support technique pour des recherches pluridisciplinaires et collaboratives. Il n'est pas rattaché à un département particulier, mais à l'université. L'équipement scientifique installé représente un investissement de l'ordre de 10 millions de dollars et le coût annuel de fonctionnement du centre est de l'ordre de 1 million de dollars. Le CNS fait partie du NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network), réseau de 13 centrales sur l'ensemble des Etats-Unis soutenu par la NSF sur un programme de 5 ans (2004 - 2009).

Le LISE "Laboratory for Integrated Science & Engineering", situé au 11 Oxford Street à Cambridge, est un bâtiment qui a coûté 150 millions de dollars et qui héberge à la fois des laboratoires de recherche et le CNS. Ce dernier compte 3 composantes : la salle blanche pour la nanofabrication (1.000 m<sup>2</sup>), le centre d'imagerie et de caractérisation (600 m<sup>2</sup>), le centre de synthèse et caractérisation des matériaux (600 m<sup>2</sup>). Le personnel dédié au CNS est de 25 personnes : il y a 7 personnels techniques qui s'occupent de la salle blanche, 5 administratifs, et le reste est réparti entre les centres sur les matériaux et la caractérisation.

Il y a 728 utilisateurs enregistrés dont 238 pour la salle blanche. Le nombre total d'utilisateurs est passé de 300 en 2004 à 728 en 2007 : il y avait 20% d'utilisateurs externes (sur un total de 300) en 2004 et 32% (pour un total de 728) en 2007. Parmi les utilisateurs externes, on dénombre 72 utilisateurs industriels. Le CNS édite une Newsletter trimestrielle interne "Nanowire".

#### **B.1.b Equipements**

Le CNS s'est équipé en favorisant une certaine diversité d'équipements et de matériaux utilisés.

- Les équipements de Nanofabrication comprennent : un système de lithographie électronique avec une résolution de 6 nm, des aligneurs de masques dont un MA6 de Karl Süss, des équipements de CVD (Chemical Vapor Deposition), un système de "Atomic Layer Deposition" (ALD) (Cambridge Nanotech Systems S200), des équipements de PVD (essentiellement pour les métallisations), de RIE (Reactive Ion Etching), de dépôts de films minces (STS à 6 canons), de traitement thermique type RTP (Rapid Thermal Processing) (marque Jipelec).

- Pour l'imagerie, il y a une majorité de microscopes électroniques (SEM, TEM monochromatique, STEM, STM,...), deux FIB (avec étages cryogéniques à -190°C et haute température à 700°C) et notamment un microscope à ions Hélium inventé à Harvard et développé par une start-up. Ce dernier a une résolution de quelques nanomètres mais devrait faire à terme mieux que les SEM avec une moindre pénétration dans la matière (donc des détails de surface mieux résolus), un certain contraste chimique, et une meilleure profondeur de champ. Un nouveau TEM 200kV monochromatique est adapté aux échantillons biologiques, un correcteur d'aberration sera installé l'an prochain. Parmi les spécialités des laboratoires locaux utilisant le CNS, on trouve : les composants d'électronique quantique, les "Quantum dots", la microfluidique (avec le Prof. Whitesides extrêmement connu dans ce domaine).

- Pour la synthèse de matériaux et la caractérisation, il y a notamment :

- 2 équipements FIB servant à des dépôts de W, C, Pt et de glace, ou bien à des techniques d'usinage réactif localisé utilisant de l'eau ou XeF<sub>2</sub>,
- un système de micro-imagerie 3D par rayons X (compatible 6") est également disponible,
- des microscopes confocaux multiphotoniques permettant d'effectuer des coupes, des caractérisations en mode CARS ou 2 photons avec reconstruction 3D,
- des microscopes à sondes locales.

Une installation sous ultravide, équipée de AFM & STM, avec une plaque chauffante allant jusqu'à 1100 °C, de la diffraction d'électrons lents et de spectroscopie Auger permet d'étudier des techniques d'auto-assemblage (inorganiques sur silicium).

Les locaux sont ouverts 24h/24 (7j/7) sauf quelques exceptions concernant les équipements dangereux qui sont arrêtés quand le personnel quitte les lieux.

Le CNS comprend également une "fonderie de lithographie douce" essentiellement basée sur les technologies PDMS (notamment pour la microfluidique) avec une machine de plasma oxygène, les systèmes de dégazage du PDMS, les bancs de silanisation, etc. A cela s'ajoutent un système de découpe par laser CO<sub>2</sub>, un environnement de manipulation de nanoparticules, un équipement de culture de cellules et de biomatériaux, et des microscopes SNOM et AFM.

La politique d'équipement est gérée par un Directoire composé de 6 professeurs.

### **B.1.c Utilisation**

Le plus souvent, les utilisateurs ont un accès direct au matériel après une période de formation qui leur donne l'accès à la réservation de certains équipements. Les coûts en personnel et les frais de fonctionnement du bâtiment sont pris en charge par l'université (les utilisateurs ne payent pas cette part). La formation constitue une part importante de l'activité des 20 membres techniques du personnel. Pour chaque type de filière (par exemple les III-V), il y a tout d'abord une première formation sur la sécurité, suivie par une formation sur les produits chimiques utilisés, et enfin, par une formation spécifique sur les matériels de salle blanche appropriés. L'utilisateur obtient alors un certificat qui lui donne accès aux systèmes de réservation de certains équipements (contrôlés par un mot de passe). 1700 sessions de formation ont été effectuées par le personnel permanent pour les 728 utilisateurs du centre, dont 280 uniquement pour la salle blanche. Il existe aussi un mode "Accès assisté" pour lequel le CNS fournit du personnel d'assistance ainsi qu'un troisième mode "Accès à distance" quand il s'agit de pratiquer des opérations simples - sur des échantillons envoyés par la poste - et fournis par d'autres centrales de technologie ou bien par des utilisateurs éloignés.

Les procédés développés par les utilisateurs doivent en principe être mis à la disposition de la communauté d'utilisateurs. Ceci est fait en ajoutant des procédés à la bibliothèque de procédés de chaque équipement. Chaque utilisation fait l'objet d'un document détaillé décrivant notamment les matériaux utilisés, et d'un examen préliminaire destiné à éviter les contaminations éventuelles. Notamment, aucun test en aveugle (avec un matériau inconnu) n'est accepté.

Il n'y a pas d'utilisateurs prioritaires (le premier arrivé est le premier servi), mais il y a des limites sur le temps total pouvant être réservé par un utilisateur sur une période donnée. Il n'y a pas de sélection de projets (sauf sur des critères d'accessibilité technique).

Propriété intellectuelle : l'université ne réclame pas de propriété intellectuelle sur toute opération qui a été effectuée par un utilisateur extérieur sans l'aide du personnel de l'université (en dehors des séances de formation). Par conséquent, les membres du personnel n'ont pas la charge de préserver des secrets

d'utilisateurs (sauf exceptions).

#### **B.1.d Coûts**

Le coût d'accès à la salle blanche est typiquement de 40 \$ / heure (avec un coût nettement plus important pour les industriels, calculé au coût du marché et incluant l'amortissement du matériel). Certains consommables spécifiques, qui ne peuvent être inclus dans le coût d'accès à la salle blanche, sont facturés en supplément. L'utilisation des instruments (caractérisation, synthèse de matériaux) est facturé à l'heure (le coût typique est de 50 \$ de l'heure).

Le budget global du centre est bouclé avec des sources (i) de l'université (pour les équipements), (ii) de la NSF (pour le fonctionnement), ainsi qu'avec (iii) la facturation des utilisateurs qui représente environ 50% du total. Le coût typique pour un projet annuel est de 15 k\$/an, somme qu'un directeur de thèse doit trouver annuellement pour chacun de ses étudiants utilisant la plateforme.

Néanmoins, aucun programme ne permet de couvrir réellement l'obsolescence des équipements : il faut s'adresser à divers organismes (état local, donations de l'industrie, équipementiers, etc. pour renouveler ce matériel).

#### **B.1.e Quelques remarques**

- L'absence de techniques d'épitaxie est surprenante, mais il s'agit de raisons historiques (pas de groupe de spécialistes existant à Harvard).
- Certains équipements sont détenus par les groupes de recherche et ne sont donc pas mutualisés. Pour éviter cela, quand un nouveau professeur est nommé, on lui paye les équipements dont il a besoin à la condition qu'ils soient gérés par le CNS et non directement à son laboratoire de manière à pouvoir les mutualiser correctement.
- Le Département d'Engineering Sciences n'a été créé qu'en 2007 (auparavant, les activités correspondantes étaient menées au sein de département plus fondamentaux (physique, chimie, etc.) ;
- Nos interlocuteurs se demandent comment faire venir des élèves-ingénieurs français (qu'ils ont l'air d'apprécier) à Harvard. Il n'existe pas de sources de financement d'origine française pour cela. Des sources privées sont cependant possibles : par exemple, Schlumberger a financé la mobilité d'étudiants "undergraduate" vers l'étranger (financement de voyages).
- Howard Stone nous explique que - contrairement à ce qui se passe en France - leur université permet à des étudiants très jeunes (18 ans par exemple) des formations sur des équipements de haut niveau comme les microscopes électroniques. Ceci leur donne le goût de la recherche dans ce domaine.

**Commentaires :** Le Centre de Nanotechnologies de Harvard est récent. Il a été très bien doté par l'université qui est manifestement riche. Il est surtout spécialisé dans les techniques de caractérisation, qui constituent la grande partie de son expertise. On peut citer en particulier la mise au point d'un Microscope à ions Hélium qui semble donner des résultats intéressants en imagerie à l'échelle nanométrique.

Le groupe a envie d'être reconnu, et manifeste un grand intérêt pour travailler avec des étrangers.

## **B.2 – COLLEGE OF NANOSCALE SCIENCE & ENGINEERING (CSNE) – Albany (New York)**

Visite préparée et accompagnée par Mike FANCHER

### Autres participants :

Michael TITTNICH (Director) : Process Engineering and IT,

James CASTRACANE, (Pr.) : Nanobiosciences,

Pradeep HALDAR (Pr.) : NanoEngineering constellation

### **B.2.a Présentation**

L'état de New York compte 22 millions d'habitants. L'université d'Albany comprend 19.000 étudiants au total. Le CNSE comprend actuellement 2300 personnes (bientôt 2800 personnes), dont 60 professeurs et 150 doctorants. Les équipes techniques comprennent 500 personnes.

La vocation du CNSE consiste à attirer les industriels pour venir travailler sur le site : 250 sociétés y sont actuellement présentes. L'objectif est d'aider les PME à commercialiser les nanotechnologies. Un autre objectif est de devenir le premier centre de Nanotechnologies pour les étudiants "undergraduate". L'état de New York est le contributeur financier principal, mais avec beaucoup de cofinancements industriels. Le CNSE est à l'origine de la première installation de fabrication 300 mm avec une lithographie à 157 nm.

### **B.2.b Visite**

**Premier bâtiment visité** : Il s'agit de la première salle blanche du site, et le bâtiment n'avait pas été conçu pour cela à l'origine. Il y a 800 m<sup>2</sup> de salles blanches. Les équipements sont concentrés sur la lithographie Extreme Ultra Violet EUV (alpha-tool 157 nm). Le CNSE a environ 20 à 50 partenaires industriels comme : IBM, AMD, FREESCALE, SONY, SAMSUNG, ... Il y a des fabricants de circuits, mais aussi des équipementiers, etc. Le centre a moins de relations avec INTEL et essaie de les faire venir à Albany.

L'ensemble des partenaires forme une sorte d'écosystème et partage globalement le risque. Ainsi tous les partenaires sont au courant des verrous technologiques clés et peuvent donc mieux s'orienter pour des investissements qui peuvent être lourds. L'université a un rôle de régulateur : les start-up sont protégées des grands groupes par l'université (mais il y a bien sûr des accords avec les start-up conduisant à un co-développement de PI).

Les technologies développées sont notamment : Si, GaN, SiGe, l'énergie (avec une forte importance des matériaux), les biocapteurs, les technologies sans fil, l'électronique de puissance, ...

**Deuxième bâtiment visité** : Forte implantation de Tokyo Electronics (qui occupe une grande part de la salle).

**Nanofab 300 mm NORTH** : ce bâtiment est dédié aux technologies post-CMOS.

Il y a aux Etats-Unis 2 grands projets fédérateurs dans le domaine post-CMOS, qui sont soutenus conjointement par la Semiconductor Industry Association et la National Science Foundation : ce sont INDEX (Institute for Nanoelectronics Discovery and EXploration) sur la côte Est, piloté par University of Albany, qui associe le Georgia Institute of Technology, Harvard University, le MIT, Purdue University, Rensselaer Polytechnic Institute and Yale University Sur la côte Ouest, c'est le projet WIN (Western Institute of Nanoelectronics) qui regroupe 3 des universités du University of California System (Los Angeles, Santa Barbara, Berkeley), Stanford, Iowa State University et University of Denver

Le bâtiment Nanofab a 2 ans et abrite 3.500 m<sup>2</sup> de salles blanches. Les activités sont focalisées sur les résines photosensibles (ex : des équipements de lithographie EUV à 25 M\$). Il existe une collaboration avec l'IMEC qui a le même équipement : le passage en production est prévu dans 7- 8 ans. Il faut souligner aussi que le

consortium SEMATECH (SEmiconductor MAnufacturing TECHnology) qui regroupe la recherche des principaux industriels de l'électronique et qui est installé à Austin (Texas) depuis sa mise en place en 1988 a décidé de rejoindre cet environnement. On peut également citer un équipement E-Beam développé en collaboration avec VISTEC qui a été déménagé de Cambridge (UK), et qui est utilisé ici pour développer des techniques de nano-impression. La réplabilité sur 300 mm pose des problèmes pour des applications purement microélectronique, mais elle devrait être suffisante pour des applications biomédicales, ou d'autres marchés de niche du même genre. Les objectifs de recherche et développement comprennent aussi la spintronique, l'optoelectronique, etc.

**Nanofab 300 mm EST** : il s'agit d'un bâtiment encore en construction, et qui semble plutôt dédié à des activités universitaires (et notamment à l'accueil des étudiants undergraduate).

### **B.2.c Présentation de Michael FANCHER, Vice President for Economic Outreach and Business**

**Development : " Bridging the nanotechnology divide : enabling nanotechnology convergence"**

#### **La centrale du CNSE**

"Albany Nanotechnology Complex" est l'un des centres phares de l'état de New York. Il a pour mission de développer : (i) Une infrastructure à l'état de l'art, (ii) Une formation initiale et continue de niveau international, (iii) Un effet de levier pour les partenariats publics-privés.

Un des objectifs est d'étudier les facteurs permettant d'obtenir une production à haut rendement et faible coût. C'est un travail fondamentalement multidisciplinaire, pour lequel il faut prendre en compte des effets provenant du rapport surface / volume, des effets quantiques, de la manipulation d'atomes et de molécules, des notions de biologie, des problématiques liées à l'énergie, les microsystèmes, les composés semiconducteurs, etc. L'expertise nécessaire est interdisciplinaire : Hyper intégration, Modélisation & métrologie, Optoélectronique, Nano-électronique, Interconnexions inter-puces), Nano-économie, Spintronique, Nanolithographie, MEMS, NEMS, NanoBiosystèmes...

Le centre a bénéficié de nombreux programmes de soutien au cours du temps :

- 1993 Center for advanced Technology (35M\$)
- 1998 National focus center consortium (100 M\$)
- 2004 Center for advanced technology in Nanoelectronics (nano bio, energy, etc.) (50M\$)
- 2005 Center for Advanced Science & Technology (12.5M\$)
- 2006 Institute for Nanoelectronics advance... part du programme INDEX, avec des industriels

Des partenariats publics privés se sont également succédés : IBM (150 M\$), SEMATECH (353 M\$) sur des masques pour la lithographie EUV, AMD Invent (600 M\$) sur les technologies 300 mm et EUV, IEL (équipements & procédés), ASML (400 M\$) etc... Le centre pour la recherche sur les semiconducteurs est doté d'une installation complètement intégrée (conception, fabrication & test) pour les nano puces. C'est la première Université qui participe aux étapes critiques du développement technologique de grands groupes (IBM, AMD, SONY, etc...).

L'université d'Albany a accompagné le développement récent de la microélectronique avec la société néerlandaise ASML :

- 2005 ASML Alpha Tool (193 nm immersion)
- 2006 ASML Alpha Tool (193 nm )
- 2007 ASML (40 nm)
- 2007 passage au 25 nm

Aujourd'hui, le centre travaille aussi en partenariat avec la société allemande "VISTEC LITHOGRAPHY" (ex LEICA Microsystems qui déménage de Cambridge UK vers Albany NY), sur l'écriture e-beam à haute cadence,

les techniques d'impression moléculaire, l'auto assemblage, etc. L'université d'Albany, avec une forte incitation financière de l'état de New York, a également attiré l'association SEMATECH qui déménage une partie de sa R&D de Austin (Texas) vers Albany.

### **Les forces économiques émergentes**

D'après M. Fancher, pour progresser, il faut investir simultanément sur : l'infrastructure, la R&D sur les procédés, la conception, etc. Aujourd'hui, le coût du passage à des tranches plus grandes devient exorbitant, les grands groupes ont délégué cette responsabilité à leurs fournisseurs et ne veulent plus acheter un outil nécessitant de développer des procédés mais une solution complète. Nos interlocuteurs pensent que les Nanotechnologies se développeront sur des tranches de 300 mm. Par ailleurs, on assiste à une restructuration des intervenants :

- Auparavant, il y avait des sociétés chargées de la fabrication de dispositifs, celles qui fabriquaient les équipements originaux (OEM), celles qui fabriquaient les sous-ensembles, les petites sociétés de nanotechnologies, les fournisseurs de matériaux, etc.
- Tous ces acteurs sont appelés à collaborer dès le début de la démarche de R&D, au sein d'un système intégré (nano-économique) pour mieux gérer le risque globalement

### **Les convergences technologiques provenant de l'ITRS**

Historiquement :

1960 Passage à grande échelle du CMOS,

1980 Nouveaux matériaux & substrats,

1990 Nouvelles architectures

2000 Nanotechnologies (nanotubes de carbone, boîtes quantiques, spintronique, électronique moléculaire,...)

D'après nos interlocuteurs, les nano-circuits vont produire de l'innovation principalement dans les applications aux transports, à l'énergie, et au biomédical. Les thèmes sur lesquels l'université d'Albany se concentre sont (i) Le « proactive computing » et (ii) les « cross-industry alignment platforms ».

#### Proactive computing :

Il n'y a pas assez de moyens pour investir suffisamment dans la diversification. Les deux dimensions à considérer sont :

More than Moore : diversification

More Moore : miniaturisation

Un développement optimal prenant en compte ces 2 aspects conduit aux concepts de SOC (System on Chip) et de SIP (System in Package). Il est donc important de développer les technologies d'intégration 3D et de packaging au niveau wafer. Les technologies clés à développer sont donc celles de l'intégration 3D au niveau wafer.

Lors de la conférence CIRCA 07 - organisée à Albany - il a été montré que les technologies clés allaient servir principalement les marchés suivants : à court terme, ce sera le marché du calcul "proactif" à hautes performances ; sur le moyen terme, il s'agira des transports (aérospatial & énergie avec des sociétés qui sont d'excellents intégrateurs), et à plus long terme, il s'agira du marché du « point-of-care » utilisant les technologies nanobiomédicales.

#### Cross-industry alignment platforms :

Une nouvelle façon de travailler avec l'industrie émerge : auparavant, la recherche travaillait d'abord et l'industrie prenait en main la suite quand il ne s'agissait plus de recherche à long terme. L'autre modèle dans lequel

l'industriel prenait en charge l'ensemble de la R&D (modèle des Bell Labs) est tombé en désuétude car il était trop onéreux et pas assez rentable pour l'industriel. Le modèle d'Albany repose sur un partenariat étroit avec les entreprises tout au long de la phase de R&D. Les équipements sont détenus par l'université, et co-financés par les industriels qui n'ont pas besoin d'en assumer la totalité des coûts de fonctionnement.

Les programmes de développement sont ainsi de 3 types :

- SRC core programs : « ITRS » (3 - 8 ans)
- MARCO focus centers IFC : « ultimate CMOS » (8 - 14 ans)
- NERC, NRI, INDEX programs : « beyond CMOS » (15 ans et plus), auxquels participe le CNSE. Il

s'agit alors de technologie universitaire orientée vers la production de PI, avec du prototypage rapide basé sur des lignes-pilotes.

L'objectif du modèle d'Albany est donc de nouer un partenariat stable en R&D entre les grandes universités et un grand nombre d'entreprises industrielles (groupes et PME), pour répondre à de grands défis à moyen et long terme.

### **De nouveaux modèles de technologies pour les Nanotechnologies**

Les produits qui généreront des revenus sont : les transports, les technologies de l'information, et le secteur de la santé qui sera probablement le plus important dans les années à venir. En particulier, des projets pour la médecine du futur sont menés avec le NIH sur la "Translational medicine" et sur les soins personnalisés (systèmes experts tenant compte des caractéristiques personnelles du patient). Dans ce cadre, les domaines à explorer pour le futur sont:

- (1) Les MEMS, nanotechnologies, microfluidique, nano-optique,
- (2) L'électronique de puissance (par ex. pour l'électroporation pulsée nanoseconde),
- (3) Le « Proactive computing », et les technologies de monitoring sans fil, etc.

Un nouveau programme vient d'être lancé par l'Université d'Albany, avec notamment des financements de la DARPA : le "National Nanotechnology Innovation & Commercialization Center (NNICC) program". Il vise des technologies SIP, SOC, "Wireless", qui sont des technologies duales par essence.

### **Marchés et tendances en nanotechnologies : un modèle de convergence pour le 21<sup>ème</sup> siècle**

Pour notre hôte, on assiste actuellement à une convergence dans le domaine des nanotechnologies, entre les applications Bio, Opto et MEMS, pour des applications aux marchés émergents de la défense, de l'énergie et du transport. La feuille de route est actuellement tracée par le gouvernement, mais les entreprises vont participer à ce développement. Dans le schéma actuel, les acteurs (recherche, développement, industrie) travaillent de manière séquentielle. L'idée d'Albany est de développer un nouveau modèle (IP-oriented lab model) dans lequel les partenaires travaillent de manière parallèle dès le début.

### **Remarque**

Il y a aussi des programmes de développement internes (ressourcement) qui représentent 10 - 15% de l'activité, pour développer des idées nouvelles.

### **B.2.d Présentation de Pradeep HALDAR : activités dans le domaine de l'énergie.**

Albany a une expertise sur les matériaux et les procédés pour l'énergie, impliquant environ 40 personnes sur le site et intéressant 50 entreprises. On peut citer :

- des activités sur le photovoltaïque (silicium & organique) avec l'incorporation de GaSe dans les cellules solaires, et le remplacement de CdS par InS;
- des activités sur les piles à combustible : structures 3D (notamment à nanotubes de carbone) pour augmenter

l'efficacité des électrodes. Dépôts assistés par aérosols permettant de déposer de petites particules à géométrie contrôlée. Des travaux sur les résistances de contact entre les cellules successives de la pile. Insertion de capteurs d'humidité placés à des emplacements stratégiques ;

- des activités en stockage d'énergie : micro-batteries et capacités à double couche électrolytique (électrodes utilisant des NTC, nouveaux matériaux supports, nouveaux liquides ioniques pour augmenter les tensions de claquage) ;
- des activités en récupération d'énergie, notamment sur les dispositifs thermoélectriques (ex. 100 couches de Si/SiC pour faire un matériau à faible conductivité thermique mais grande conductivité électrique, le ZT obtenu est de 3) ;
- des activités sur les composants SiC et GaN
- des activités sur les Supraconducteurs (type YBaCuO)..
- des projets sur les LED utilisant le GaN

Les recherches à l'échelle nano comprennent la démonstration mais aussi le test en vraie grandeur des composants étudiés. Un nouveau centre est d'ailleurs en cours de création : le National Institute of Sustainable Energy en collaboration avec une société d'architecture qui cherche à développer des "bâtiments intelligents". L'idée consiste à tester de nouveaux nano dispositifs dans un bâtiment réel le ZEN (pour Zéro Energy Nano building) qui sera construit sur le campus, et qui serait à énergie positive (non relié au réseau de distribution et générant sa propre électricité).

#### **B.2.e Présentation de James CASTRACANE : activités sur les Microsystèmes et les Dispositifs Biomédicaux.**

C'est un domaine en très forte croissance impliquant un groupe de 35 personnes. Il va s'étendre dans le nouveau bâtiment en construction. L'université a déjà un large portefeuille de sociétés dans ce domaine. Dans le domaine des microsystèmes, le point clé est de passer du matériau à l'intégration système. Les éléments mis en jeu sont :

- les dispositifs optiques (réseaux, miroirs, dispositifs de focalisation, dispositifs massivement parallèles pour l'interconnexion puce-à-puce) ;
- la récupération d'énergie (Il y a des projets utilisant des cantilever vibrants associés à une récupération d'énergie de type inductif).
- les valves pompes, microcanaux pour les applications microfluidiques ;
- leurs utilisations dans des applications biomédicales dans lesquelles les cellules ou les protéines pourront être utilisées comme capteurs ;

Pour cela des partenariats ont été noués avec des biologistes afin de développer des capteurs (5 biologistes ont été recrutés au CNSE de l'université d'Albany). Actuellement, 300 m<sup>2</sup> de locaux spécifiques sont dédiés au biomédical et sont utilisés pour des activités de culture cellulaires et tissulaires (niveau L2).

Les technologies clés sont l'intégration 3D, l'empilement de wafers, l'intégration plaque à plaque, les interconnexions entre plaques. De nouveaux matériaux doivent également être maîtrisés (PDMS, Polystyrène, etc.).

Un programme du NIH de 5 ans a été lancé sur les puces de capteurs permettant d'étudier la migration de cellules cancéreuses (à l'origine des métastases). Huit personnes travaillent sur ce projet. Ces puces vont attirer les cellules (au moyen d'hormones) pour les piéger, et permettront également d'en mesurer les caractéristiques.

De manière générale, les aspects nano consistent surtout à étudier et maîtriser :

- les technologies de modification de surfaces ;
- l'utilisation de particules nanométriques dans des systèmes microfluidiques
- l'injection de marqueurs nanométriques dans des cellules vivantes.

Par ailleurs, une autre activité porte sur les capteurs chimiques :

- FET ou HEMT fonctionnalisés, par exemple un biocapteur basé sur du GaN fonctionnalisé par des brins d'ADN
- capteurs de qualité de l'air, radicaux libres de chlore pour la qualité de l'eau, capteurs SAW ;

Pour soutenir ces activités, des financements peuvent être obtenus en utilisant le programme fédéral STTR (Small business Technology TRansfer program) , suite du SBIR), qui soutient des partenariats entre petites entreprises et institutions a but non lucratif (associations et universités).

Pour développer des technologies biocompatibles (et qui ne sont pas CMOS-compatibles), une nouvelle salle blanche biomédicale de 100 m2 sera installée dans le nouveau bâtiment pour réaliser des petites séries de l'ordre de 10 000pièces (100 wafers).

### **B.2.f Propriété intellectuelle**

Ce qui est fait avec les équipements de Albany est la propriété de l'état de New York. Ce dernier négocie donc librement les licences, les priorités, etc. avec les industriels. Des licences exclusives avec des sociétés ou bien des groupes de sociétés sont généralement négociées. Il faut noter que 40% des royalties reviennent à l'inventeur en tant qu'individu.

L'université d'Albany a une politique d'ouverture à tous les industriels intéressés et s'attache à :

- Réduire au mieux les investissements des entreprises (partage des investissements et du fonctionnement) ;
- Gérer les compétitions entre les partenaires par une compartimentation du travail : des NDA sont signés sur absolument toutes les activités (incluant le développement de procédés : les actions de R&D et les actions de développement de procédés font l'objet d'accords séparés). Les personnels des sociétés peuvent travailler sur leur projet de façon confidentielle, mais il y a également des projets communs entre plusieurs sociétés.

#### **Commentaires :**

Le Centre de Nanotechnologies d'Albany est extrêmement tourné vers le développement industriel, avec des investissements colossaux (plus de 2 milliards de dollars déjà investis) provenant de nombreuses entreprises partenaires.

Les moyens de caractérisation ainsi que de modélisation et de simulation paraissent plutôt sous-dimensionnés par rapport aux énormes moyens de micro fabrication que l'on voit dans les salles blanches. Pour ces aspects, le centre compte sur des collaborations extérieures. Le centre est propriété de l'état et son but principal est de mettre des industriels en relation afin d'augmenter leur compétitivité en associant un problème avec une solution. C'est un modèle très intéressant (bien que culturellement difficile à accepter pour des universités françaises), dans lequel c'est une université qui se charge de la coordination et de la mutualisation d'investissements industriels, et qui régule les questions de concurrence entre les entreprises, sur un domaine hautement technologique. L'université accueille de nombreux industriels plus ou moins complémentaires (fabricants de circuits, équipementiers, etc.), ou bien concurrents, et en assume les conséquences en matière de gestion de la propriété intellectuelle. Les industriels se pressent pour venir à Albany et l'université doit effectuer une sélection

Ces investissements ne servent cependant que des projets à relativement court terme, et la recherche à long terme nous a paru faiblement représentée sur ce site.

## **B.3 – CORNELL NANOSCALE SCIENCE & TECHNOLOGY FACILITY (CNF) – Ithaca (New York)**

Visite préparée par Sandip TIWARI, Directeur du réseau NNIN, et George G. Malliaras, Directeur de Cornell Facility

### **B.3.a Présentation du "National Nanotechnology Infrastructure Network" (NNIN) – Exposé de Sandip TIWARI**

La première centrale de technologie du pays (sub-micron facility) a été fondée à l'université de Cornell en 1977. Depuis des réseaux de centrales ont été organisés aux Etats-Unis. Dans la période 1994-2004, il y avait un réseau de 5 sites (Stanford, UC Santa Barbara, Cornell University, Pennsylvania State University, Howard) uniquement dédié à la fabrication. Avec le développement du programme NNI, ce réseau s'est progressivement étendu en devenant le NNIN (National Nanotechnology Initiative Network) et compte maintenant 12 sites (+ 1 affilié) qui fournissent un soutien en nanotechnologies incluant la formation et la prise en compte sociétale et éthique. En 2007-2008, ce réseau a accueilli 4630 utilisateurs (étudiants, scientifiques seniors, et entreprises), et produit 4300 publications. Chaque centre - adossé en général à une université - développe librement des compétences spécifiques, et choisit en particulier ses investissements en fonction de cette politique.

#### **Mission de l'infrastructure**

La mission du NNIN est de permettre un large accès aux infrastructures de nanotechnologies, pour l'ensemble de la communauté scientifique et pour des projets de R&D et de soutien à des utilisateurs externes. Le réseau est constitué autour de centres universitaires permettant d'avoir accès à des experts de ce domaine. Trois missions complémentaires sont adjointes à ce programme:

- (1) Calcul & modélisations ;
- (2) Formation & diffusion des connaissances ;
- (3) Problèmes éthiques et sociétaux.

#### **Les activités principales**

Le réseau soutient la recherche effectuée par les utilisateurs. Il maintient accessibles des outils de recherche avancés. Il fournit une aide au développement de procédés et la formation associée. Les utilisateurs sont (i) des étudiants en doctorat ou des étudiants "undergraduate" et des chercheurs universitaires, (ii) des grands groupes ou des petites sociétés, (iii) des laboratoires nationaux.

Le principe est celui d'un accès rapide (délais de 2 semaines environ) et minimisant les coûts : par exemple, le NNIN s'occupe de trouver des logements à proximité pour les utilisateurs, de participer à l'organisation des voyages etc., tout en facturant un minimum de coûts administratifs. Les procédés technologiques à utiliser pour un projet donné sont étudiés avec les utilisateurs avant leur arrivée (par courriels, vidéoconférences, etc.)

Les contrats d'utilisation sont simples et ne comportent pas de clauses de propriété intellectuelle (l'utilisateur reste propriétaire de ses idées et de ses résultats) : seul un simple "Memory of Understanding" est signé et prévoit principalement une responsabilité de l'utilisateur en cas de détérioration de matériel. Les projets ne sont pas sélectionnés : il est supposé que si l'utilisateur a trouvé de l'argent pour son projet, c'est que le projet est raisonnable.

Pour les industriels, le coût est bien sûr différent et calculé sur le prix du marché : en effet, la NSF soutient l'opération en fournissant un budget de fonctionnement et un budget pour le personnel technique, ce qui doit se traduire par un coût inférieur pour les utilisateurs académiques.

Les activités sont globalement financées par les fonds de la NSF, la participation des utilisateurs, la contribution des universités aux équipements, d'autres programmes d'aide, des dons, etc.

Le personnel du NNIN doit s'assurer que les équipements fonctionnent correctement, que les utilisateurs sont correctement formés (la formation représente 50% de leur temps de travail), et que de nouveaux procédés sont développés et rendus accessibles aux utilisateurs. Il n'y a pas d'obligation à partager les procédés avec les autres utilisateurs, mais les échanges d'informations se font naturellement.

### **Politique d'équipement**

Le réseau comporte 850 équipements de grande taille, et 150 personnels (en équivalent temps plein) en soutien. Ces derniers fournissent une expertise scientifique ainsi que sur les procédés de fabrication. Il y a eu en moyenne 3800 utilisateurs académiques (dont 40% extérieurs) par an, ainsi que 350 industriels.

Il existe une coordination entre les différents centres mais pas d'obligation de choisir des équipements que ne possèdent pas les autres centres (les universités hésitent naturellement à s'équiper quand elles peuvent trouver la ressource facilement accessible ailleurs). De plus, chaque université est plus ou moins spécialisée sur le plan technique ce qui oriente ses acquisitions d'équipements.

L'impact scientifique est large : mesure de la distribution de phonons "chauds", effets quantiques, objets aux échelles moléculaires et supra-moléculaires, vibrations de nanotubes de carbone, détection résonante de virus, ...

### **Impact éducatif**

La NSF insiste sur la mission d'éducation des centres du réseau. Cela concerne non seulement la formation des utilisateurs, mais aussi des opérations qui concernent un plus large public. On peut citer par exemple des formations sur les nanotechnologies au sein du NNIN destinées aux meilleurs étudiants venant d'institutions qui ne proposent pas de formation doctorale, la publication d'un magazine sur les nanotechnologies destiné aux enfants de 5 ans, la réalisation de laboratoires sur roues pour illustrer des expériences dans les écoles, etc.

Des écoles d'hiver sont aussi organisées par le réseau dans des pays en voie de développement. Cette année par exemple, un cours sur "Electronique & optoélectronique organique" est organisé en Inde : un groupe de 5 permanents et 10 doctorants américains (qui postulent pour devenir enseignants à l'université) vont se joindre à une trentaine de collègues indiens pour cette école thématique.

Au total, le réseau forme 1600 nouveaux utilisateurs par an. De plus 25 startup sont créées chaque année au sein du réseau (à Cornell, 5 startup sont créées chaque année dans ce domaine).

### **B.3.b Présentation du "Cornell Nanoscience Facility" (CNF) – Exposé de George MALLARIAS**

Le centre a été fondé en 1977 pour soutenir les sciences et les technologies à l'échelle nanométrique. Il doit regrouper des ressources à l'état de l'art et un personnel d'experts. Le CNF a 700 utilisateurs par an (70% sont des doctorants, et la moitié proviennent de l'extérieur). Une grande part vient de l'état de New York (qui comporte 14 Universités ainsi que beaucoup d'entreprises). L'accueil des utilisateurs est facilité par un centre d'hébergement à faible coût (25 \$ / nuit). La phrase clé de la publicité du CNF est : "YOUR STATE OF THE ART NANOTECHNOLOGY LABORATORY"

### **Salle blanche**

La salle blanche actuelle (coût du bâtiment 65M\$, équipements 100M\$), a une superficie de 1600 m<sup>2</sup>, et a été terminée en 2003 (la salle blanche précédente avait une surface de 850 m<sup>2</sup>). Les équipements permettent des travaux sur des tranches de 4 & 6". Les équipements sont accessibles 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Les utilisateurs suivent d'abord une formation, puis ils utilisent les machines par eux-mêmes. Ils doivent "badger" à l'entrée et à la sortie de la salle, et un écran de contrôle à l'extérieur de la salle donne en permanence la liste

des utilisateurs présents dans la salle. Un système vidéo permet de surveiller l'ensemble des locaux de salle blanche (caméras jusque dans les hottes), et de repérer les fauteurs de troubles (les vidéos ne sont regardées que si un problème a été identifié) et d'analyser les incidents. Ce genre de problème n'arrive en moyenne qu'une fois par mois et les fauteurs de troubles sont suspendus d'utilisation de salle blanche le temps de refaire une formation pour retrouver leur autorisation d'accès.

### **Coût horaire par équipement**

Le coût horaire pour la plupart des équipements "courants" (dépôts, gravures) est d'environ 27\$/heure. Cela peut aller jusqu'à 100\$/heure pour la lithographie e-beam. Le temps de réservation est limité en fonction de l'équipement (pour certains il est possible de les réserver pour 12 heures, pour d'autres le temps de réservation est limité à 2 heures seulement). Le coût d'un projet est estimé au début sur la base de coûts horaires variables selon les équipements, mais le coût final doit être "raisonnable".

Sur l'année le coût d'utilisation moyen est de : 14.000 \$ / an pour les utilisateurs universitaires et 55.000 \$ / an pour les utilisateurs industriels. Le tarif pour les industriels est calculé sur le coût du marché, les activités du CNF ne devant pas être lucratives. Le coût total doit être couvert au moins à 60%. Pour cela, l'utilisation de la salle est nécessairement payante selon le modèle décrit ci-dessus. La plateforme est gérée comme une PME avec un suivi mensuel régulier. La contribution de NNIN est décidée en fonction des performances de la plateforme. La gestion du personnel technique de la salle dépend étroitement des finances.

### **Equipements**

Au nombre de 80, ils comprennent notamment : 2 stations de lithographie e-beam (sub-30 nm sur des substrats de 300 mm), des générateurs de masques (laser et fentes), un stepper i-line, des séries de fours pour traitements et dépôts thermiques (20 tubes), des outils de gravure chimique,...Les outils récemment acquis sont un bâti de "Atomic layer deposition", un implanteur ionique (énergies intermédiaires, le seul implanteur du réseau NNIN), un système de dépôt de polymères par jet d'encre (pour la biologie), un nanomanipulateur, un système de nano-impression Nanonex.

### **Modélisation à l'échelle nano**

Un groupe de 70 utilisateurs provenant de 9 états (incluant le Japon, le Canada, la Suède et la France ) travaille dans ce domaine depuis 3 ans, avec 15 codes scientifiques différents, sur des clusters de Cornell.

### **Personnel**

Il est composé d'un directeur (mi-temps, nommé pour trois ans), d'un directeur opérationnel (temps plein), et de 22 personnels scientifiques & techniques (16 ingénieurs et 6 doctorants) qui sont chargés de la formation des utilisateurs. Ce sont tous des experts de haut niveau couvrant l'ensemble des techniques utilisées (le dernier recruté est un microbiologiste). Chaque lundi, ils prennent en charge un nouveau groupe de 5 à 10 personnes : après une formation basique de 1,5 jour (sécurité, comportement en salle blanche, questions de société et d'éthique...), les personnes sont formées sur les équipements qu'ils vont utiliser. La majorité des utilisateurs sont des doctorants ou des post-docs. La qualification a une durée de 1 an : une remise à niveau légère est prévue pour les personnes qui n'ont pas utilisé l'infrastructure pendant plus de 1 an.

### **Résultats marquants**

Nano-électronique sur Silicium, Spintronique, Photonique (guides en silicium), Micromécanique (montures AFM articulées), Biotechnologies (Lab-on-chip), Médecine (prothèses neuronales), ...

### **Centres de l'université de Cornell**

Les structures appartenant à l'université de Cornell et proches du CNF sont : le "Cornell Center for Material

Research" et le "Center for Nanoscale Systems" qui regroupent 103 universitaires permanents au total. Il y a aussi d'autres centres comme le "NanoBioTechnologyCenter" (NBTC) et le "Center for High Energy Synchrotron Source", qui utilisent beaucoup les services du CNF.

### **Interactions avec les utilisateurs**

#### ***User programme :***

C'est le mode le plus utilisé, dans lequel les utilisateurs font leur fabrication eux-mêmes. La politique de propriété leur est favorable (pas de part de propriété demandée par le CNF). Le premier contact se fait par courriel ou par téléphone. Une proposition de 2 pages maximum permet de décrire brièvement le projet. Une réponse du CNF sur la faisabilité technique du projet est donnée très rapidement (en typiquement 2 semaines). Une partie de la formation préliminaire peut être faite par Internet. L'estimation du coût se fait au moment de la discussion.

#### ***Utilisation à distance***

Ce mode d'utilisation n'est pas encouragé mais il y a eu néanmoins 58 utilisateurs à distance l'année dernière. C'est alors le personnel technique qui se charge du travail et qui renvoie le résultat par la poste. Il est réservé pour les actions de faisabilité et les projets pour lesquels le facteur temps est particulièrement limitant.

### **Diffusion des connaissances & technologie ouverte**

Des formations sont organisées avec des conférences faites le matin et des TP prévus en salle blanche l'après-midi. Des discussions techniques ouvertes sont organisées entre les utilisateurs. Les permanents de la salle blanche ne peuvent pas signer de NDA, et ce qui leur est dit (sur les process par exemple) peut être mis à disposition des autres utilisateurs.

### **Projets et tendances en cours dans le domaine des nanotechnologies :**

Les tendances citées sont : la nano-médecine, les question sociétales & éthiques, la lithographie par nano-impression, les semiconducteurs à base carbone, l'adoption des nanotechnologies par la communauté du biomédical. Signalons aussi la construction d'un laboratoire dédié à l'électronique organique : structuration de semiconducteurs organiques, électronique flexible, dispositifs organiques pour l'énergie (OLED, cellules solaires), capteurs, équipement de dépôts organiques en phase vapeur (Trovato). Par ailleurs, un bureau du CNF a été créé au "Weill medical center : c'est un centre médical qui couvre la région de la ville de New York. L'idée est d'interagir plus avec le milieu médical. Une collaboration avec la National Cancer Institute (NCI) est également lancée.

### **Emploi des doctorants de l'université de Cornell**

20 % deviennent des universitaires, 75 % rejoignent l'industrie, et 5 % passent dans le secteur bancaire & financier (pour gagner beaucoup d'argent...!).

**Commentaires :** Le CNF est le prototype du modèle américain de gestion des centrales de technologie universitaires. Il a une expérience de plus de 30 ans dans le domaine et a su mettre au point un système flexible et efficace avec peu de personnel permanent. Sa grande force réside dans la formation et la responsabilisation des utilisateurs. Après le système populaire dans les années 1990 du MCNC ou de Sandia Labs (qui offrait un service de microfabrication réalisé par des équipes spécialisées), c'est maintenant l'intervention directe des utilisateurs qui est privilégiée, ce qui a un effet de levier énorme sur la formation générale des entreprises américaines aux nanotechnologies. De façon générale, un véritable continuum formation-recherche-innovation est favorisé. Il est frappant d'apprendre que 1600 nouveaux utilisateurs sont formés par an dans le réseau du NNIN. Dans ce contexte, toutes les PME des Etats-Unis pourront bientôt tirer parti des nanotechnologies sans aucune inhibition pour ce domaine et en sachant utiliser de manière libre et autonome des infrastructures de très haut niveau.

## ***B.4 – PENN STATE UNIVERSITY , NANOFABRICATION FACILITY – University Park (Pennsylvanie)***

Visite préparée par Theresa MAYER, Directrice du Centre.

### **B.4.a L'université de PENN STATE**

Penn State University est la 13ème université des Etats-Unis. Elle rassemble 56.000 étudiants undergraduate et 14.000 étudiants graduate. Les frais d'inscription sont de 25.000 \$ par an. Comme dans la plupart des universités américaines, les professeurs sont payés pendant 9 mois par l'université (ils ne sont pas payés pendant les vacances). et doivent trouver le salaire des 3 autres mois en utilisant les contrats de recherche. La plus forte contribution financière à l'Université provient du Department of Defence (DoD) : elle comprend un laboratoire entièrement consacré à la défense qui a été fondé en 1940 pour étudier les torpilles. L'université prélève 48% sur tous les contrats pour payer les frais d'administration et d'infrastructures (générales)

L'université est organisée en Colleges (Science, Engineering, Mineral research,...) qui sont les structures chargées de l'enseignement, et qui sont les véritables employeurs des universitaires. Les membres des départements font leur recherche au sein de 6 instituts transverses (Material Science, Life Science, Energy & environment, Social sciences, + deux autre instituts plus mineurs). L'avis des instituts est donc important surtout pour le choix du profil de recherche des personnes recrutées. Les infrastructures de recherche (facilities) dépendent des Instituts.

### **B.4. b Le Materials Research Institute (MRI).**

C'est l'un des Instituts de l'université qui s'occupe de coordonner les activités de recherche dans ce domaine. Pour cela, il coordonne, administre, et finance plusieurs infrastructures de recherche, fabrication et caractérisation. Ces infrastructures sont ouvertes aux utilisateurs extérieurs. Elles comprennent du personnel technique permanent qui forme les chercheurs à l'utilisation des outils, ou qui les assistent pour leurs besoins de caractérisation et de fabrication. Ces infrastructures comprennent :

#### ***a. Le "Materials Characterization Laboratory (MCL)" :***

Infrastructure de caractérisation avec des outils analytiques comme la microscopie, l'analyse de surface et de couches minces, la spectroscopie optique. Les outils comprennent entre autres : 3 TEM, des SEM, AFM, Spectroscopie Auger, XPS, micro X-ray, Raman, etc. Les équipements sont utilisés moyennant paiement des utilisateurs. Le budget opérationnel annuel est de l'ordre de 2.5 M\$.

#### ***b. Le "Nanofabrication Laboratory"***

Il a été fondé en 1995. Il fait maintenant partie du NNIN, et met à disposition des équipements et de l'expertise pour les chercheurs en nanotechnologies. Il permet la fabrication d'une gamme de micro- et nano- composants électriques, micromécaniques, ou optiques pour la recherche et l'industrie. Les technologies étudiées ne sont pas orientées vers les CMOS, mais plutôt spécialisées sur les matériaux "exotiques" comme les oxydes complexes (ferroélectriques, piézoélectriques, etc.). Il comprend 600 m2 de salles blanches (1000 m2 sont en projet pour le nouveau bâtiment du MRI programmé dans 3 ans). Le budget opérationnel annuel est également de l'ordre de 2.5 M\$.

#### ***c. Le "W. M. Keck Smart Materials Integration Laboratory (Keck SMIL)"***

C'est une infrastructure qui aide à la mise au point d'une nouvelle génération de composants intelligents intégrés. Le laboratoire travaille sur des aspects d'intégration de composants avec des fonctions mécaniques, électriques et optiques et se charge de caractériser les matériaux et dispositifs produits pour cela.

#### ***d. Le "Materials Simulation Center (MSC)" :***

Il s'agit d'un groupe de personnels qui développent des simulations et techniques de conception de matériaux à l'échelle atomique (alliages à hautes performances). Il conçoit aussi des précurseurs pour la croissance épitaxiale, fait des calculs de propriétés électroniques et structurales de matériaux à l'échelle nanométrique, ainsi que de la simulations de procédés.

Il y a aussi 3 autres infrastructures moins importantes : le "Advanced Coatings Lab", le "Nuclear Magnetic Resonance Lab" (NMR), et le "Mechanical Testing Laboratory (MTL)".

#### **B.4.c Présentation de Theresa Mayer: le Materials Research Institute (MRI).**

##### ***Stratégie de développement***

Le MRI s'intéresse principalement aux matériaux "Difficiles à travailler" tels que :

- Les oxydes complexes,
- Les matériaux ferroélectriques ou piezoélectriques.
- Les matériaux organiques.

Les outils utilisés sont des machines de dépôt pour les capteurs ou les actionneurs. De nouvelles techniques de gravure (DRIE par exemple), des systèmes de gravure spécifiques, etc. Par exemple, une machine spécifique de gravure vient d'être installée : il s'agit d'une machine de gravure plasma (ICP) à couplage capacitif de marque TEEGAL qui est l'idéal pour graver des oxydes complexes. Des développements de nouveaux outils de microfabrication sont également effectués.

Dans le réseau NNIN les centrales sont en partie spécialisées : par exemple l'université de Michigan est connue pour les MEMS, et l'université de Penn State est connue pour les oxydes complexes. Les utilisateurs extérieurs du NNIN demandent principalement à ce centre (le Nanofabrication Lab) la réalisation de couches de PZT (de 100 nm à 3 microns d'épaisseur).

Les principaux équipements du Nanofabrication Lab sont :

La lithographie : de 20 nm à l'échelle macro.

- Lithographie e-beam (20 nm);
- Lithographie par nano-impression ;
- Stepper ;
- Générateur de masques ;
- Aligneurs optique par projection et par contact ;
- Ecriture laser directe ;
- Bonding haute température ;
- Stations d'enduction, cuisson et développement de résine ;

Les films minces : Nettoyages de surface in-situ, dépôts à hautes températures, évaporation thermique et par canon à électrons, pulvérisation, FIB, spin-on-dielectrics. Des dépôts de matériaux exotiques comme le Parylène, ou le LIF sont aussi réalisés.

CVD & procédés thermiques :

- LPCVD, PECVD pour les diélectriques (oxynitrides de silicium notamment), les couches minces de silicium, Atomic Layer deposition
- Oxydations thermiques atmosphériques, sèches et humides, recuit de contact p- et n-, recuits rapides.

Gravure sèche et humide : Procédés standard + DRIE silicium pour les MEMS, RIE chlorée.

Un procédé remarquable permet de réaliser de la gravure profonde sur PZT (tranchées de largeur 8 microns avec une profondeur de plus de 100 microns). Il s'agit d'un bâti Applied Materials de gravure ICP utilisant des

gaz chlorés avec un procédé de type Bosch (basé sur des cycles rapides de gravure - passivation). Le procédé a été transféré avec succès sur le nouveau bâti "TEGAL".

Microstructure analysis (in material research lab.) :

Ellipsométrie, Raman, spectrométrie IR à transformée de Fourier, Smart materials processing (class 100 clean room) KECK SMILL , Céramiques, oxydes complexes, PZT, PLZT, BaTiO<sub>3</sub>, BiZn, NbO.

Par exemple, des gravures anisotropes de profondeur 70 microns ont été réalisées dans du PZT pour des applications aux MUT (Micro Transducteurs Ultrasonores). Une startup a d'ailleurs été récemment créée dans ce domaine des MUT.

#### **B.4.d Ressources matérielles et humaines**

Equipements : Ils sont parfois acquis grâce à des appels d'offres de la NSF, du DOD, etc. Les projets de développement d'outils permettent d'obtenir des budgets intéressants (par exemple un financement de matériels et de personnel sur 3 ans). Cependant, la NSF ne finance pas les personnels utilisés pour la maintenance des outils. Les industriels, l'état de Pennsylvanie, mais aussi l'université participent également à ces acquisitions de matériels (le nouveau bâti de gravure est obtenu au moyen d'un co-financements de 3 partenaires : la NSF, l'université et un industriel). Le parc de matériel s'est plutôt étoffé ces dernières années.

Personnel : 10 personnes en nano-fabrication, et 18 en caractérisation.

#### **B.4.e Fonctionnement.**

Ouverture 24h/24 et 7 jours /7. L'accès se fait via un contact par internet.

Mode d'opération par l'utilisateur : quand l'utilisateur vient faire lui-même sa fabrication, il conserve entièrement sa propriété intellectuelle. Il doit d'abord se former (3 jours de formation initiale incluant la sécurité, la lithographie etc.). Une prise en main de l'ensemble des équipements demande une formation qui dure 6 mois (par exemple pour la lithographie e-beam). On retrouve le même type de fonctionnement que dans les autres centrales NNIN : accès par badge dans la salle, mot de passe pour les équipements, et surveillance vidéo.

Coût : l'accès est payant, selon le même modèle rencontré dans les autres plateformes labellisées NNIN. Le coût horaire des équipements est extrêmement détaillé, et peut varier de 40 \$ / heure à plusieurs centaines de dollars par heure. La principale source de financement du fonctionnement provient de la facturation des utilisateurs.

Accès à distance : dans ce cas, la propriété intellectuelle est partagée car l'utilisateur fait appel à des personnels de l'université.

La plupart des bûts sont utilisés pour une grande variété de matériaux. Des procédés de pré- et post-nettoyage ont été mis au point pour éviter les contaminations. Dans certains cas d'utilisation de substances très polluantes, l'utilisateur est encouragé à acheter son propre tube qui lui reste réservé. La zone CMOS est isolée et aucune plaque ayant transité par une autre zone ne peut y entrer.

Il y a 25% d'utilisateurs extérieurs, et parmi ces extérieurs 80 % d'entreprises. Certaines (10 à 20) sont des utilisatrices assidues de l'infrastructure. Certains équipements ont été obtenus par des donations d'entreprises (un équipement vient de Lucent par exemple). L'année dernière il y avait environ 90 utilisateurs externes dont 20 entreprises très assidues. Dans certains cas, un contrat avec l'entreprise lui garantit un nombre d'heures d'utilisation hebdomadaire sur des équipements déterminés. Seuls quelques outils sont surchargés, la plupart ont un taux d'utilisation de 50 % car ils sont très spécialisés. Il y a environ 20 - 30 utilisateurs dans la salle blanche pendant la journée et 5 - 10 pendant la nuit. L'appartenance au réseau NNIN permet d'échanger des informations avec les autres centrales. Il y a un workshop réservé aux personnels des centrales chaque année : l'année dernière le thème était la RIE, cette année ce sera la lithographie électronique.

#### **B.4.f Présentation de Paul WEISS : les défis en recherche sur les matériaux à l'échelle nanométrique.**

La présentation de Paul Weiss illustre les activités sur les polymères à l'échelle nanométrique. Il cite plusieurs fois ses liens avec Christian Joachim du CEMES de Toulouse (organisation d'une conférence).

##### Les défis de la lithographie chimique avancée :

- Structurer des molécules uniques en environnement contrôlé (en conservant leurs fonctionnalités, leurs bio-spécificités,...) ;
- Construire des structures moléculaires 3D avec une précision à l'échelle de la molécule (placement & juxtaposition de molécules pour faire des structures & fonctionnelles plus complexes) ;
- Comprendre l'auto-assemblage & les interactions intermoléculaires (ex : rôle des dislocations dans la dissolution des structures),
- Étendre la gamme des matériaux qu'il est possible de structurer : approche constructive

##### Placer des molécules uniques en environnement contrôlé, en optimisant les interactions intermoléculaires :

Commutation par champ électrique de l'état de molécules individuelles (bien choisies) placées dans des couches de type SAM. La conformation de la molécule (et donc ses interactions électroniques avec les autres molécules de la couche SAM) est modifiable par une commande électrique (à basse température...).

##### Contrôle latéral de structures réalisées par des techniques d'impression par tampon PDMS :

- L'impression par contact (soft lithography) a été popularisée à l'échelle de 10 microns par WHITESIDES, la lithographie "dip pen" a été démontrée à l'échelle du micron par MIRKIN. L'idée est d'aller plus loin en combattant la diffusion latérale des molécules que l'on reporte. Pour cela, des monocouches de molécules spécifiques empêchant la diffusion latérale des molécules à reporter sont d'abord déposées ce qui permet de réaliser des structures aux dimensions nanométriques stables.
- Étude de nouvelles familles de molécules pour l'auto-assemblage et la structuration (synthèse de molécules dont la réactivité est directionnelle et commandable, pour réaliser des constructions 3D).

##### Capteurs cérébraux in-vivo.

Les neurotransmetteurs doivent pouvoir être détectés en très faibles concentrations à l'échelle micro-nano (ex. de détection de la sérotonine). L'échelle ultime est celle de la synapse (10 - 20 nm).

- Étude de surfaces permettant de capturer des biomolécules très petites. Il faut étudier de nouvelles réactions "douces" qui ne génèrent pas la chaleur qui dissout en général les structures. Les outils utilisés sont le microscope confocal à fluorescence, la micro-balance à quartz, l'AFM, la spectroscopie de masse, la résonance de plasmons de surface,...
- Réalisation d'un outil d'auto-assemblage de molécules basé sur la Résonance Magnétique Nucléaire
- Réalisation de capteurs à nanofils permettant d'extraire simultanément un grand nombre d'informations.

#### **B.4.g Présentation de Suman DATTA : The "Green Transistor" Era.**

S. DATTA s'intéresse aux nano-transistors, et en particulier aux moyens d'éviter la croissance rapide de la consommation énergétique des circuits intégrés au fur et à mesure que leur densité augmente. Il explique que Intel (son précédent employeur) mettra probablement sur le marché une structure à 3 grilles pour le noeud à 22 nm. La diminution d'échelle des CMOS tend maintenant vers des limites fondamentales : en particulier, la puissance prévue pour faire fonctionner un circuit CMOS en technologie 16 nm est de  $1200 \text{ W/cm}^2$  ! De plus, les variations spatiales de température sur un circuit très dense sont énormes (le flux de chaleur présente une distribution de pics de surintensité importante au niveau des transistors). Une grille de 10 nm a une largeur de l'ordre du dixième de celle du virus de la grippe.... Il est possible de diminuer la tension de fonctionnement, mais au prix d'une diminution de fréquence de travail, qu'il faut compenser - par exemple en effectuant des calculs en

parallèle dans des systèmes à plusieurs coeurs. Les grandes entreprises de microélectronique investissent dans quatre "Semiconductor Research Centers" (incluant PENN state) qui vont travailler sur ce genre de problèmes pour les nouveaux nano transistors.

#### **B.4.h Présentation de Niitin SAMARTH : Spintronique avec des nanostructures à semiconducteur.**

La NSF soutient un "Centre for Nanoscale Science" qui est composé de groupes interdisciplinaires de recherche. L'un des groupes s'intéresse aux nanofils à semiconducteurs (la DARPA a financé ce groupe pendant 5 ans mais a arrêté car les résultats n'étaient pas encore transférables à l'industrie).

Phénomènes dépendant du spin dans les semiconducteurs : comment en faire de réels composants :

Quelques exemples sont montrés :

- Magnéto-photonique dans des structures confinées,
- Injection de spin dans des nanostructures (NSF) ;
- Organisation de spin dans des systèmes 1D (NSF) ;
- Manipulation de frontières de domaines magnétiques dans les nanostructures (ONR). L'équipement utilisé est de la MBE pour réaliser des alliages (II-Mn-VI) ou des alliages (III-Mn-V) ;
- Contrôle du ferromagnétisme par voie électrique ;
- Contrôle de la dynamique de spin par voie photonique : dans un laser à microdisque (en GaAs), le temps de relaxation du spin est considérablement rallongé à la longueur d'onde laser au-dessus du seuil d'oscillation... la raison est inconnue pour le moment.

#### **Commentaires :**

Le MRI de Penn State University est un centre spécialisé dans les matériaux spéciaux : il a une stratégie de niche et mise sur le développement d'oxydes complexes (ferroélectriques en particulier), ainsi que le développement de techniques de lithographie à l'échelle nanométrique utilisant des techniques d'auto assemblage de matériaux moléculaires. En fait, l'équipement de la centrale reflète peu ce positionnement particulier car il reste très généraliste (seuls quelques équipements spécifiques sont dédiés à cette stratégie). Ce centre fait partie du NNIN et a manifestement les mêmes règles de fonctionnement que le CNF, bien que le taux d'occupation de la centrale semble plus faible. Il semble également globalement moins bien doté que ceux hébergés par des universités privées; néanmoins une nouvelle salle blanche va y être construite.

### ***B.5 – Center for Nanoscale Science & Technology (CNST) : Campus du National Institute of Standards and Technology (NIST) de Gaithersburg (Maryland)***

Visite préparée par Robert CELOTTA, Directeur du CNST.

#### **B.5.a Présentation générale du NIST: exposé de Claire M. Sundry, Directrice des relations Internationales**

Le National Institute of Standards and Technology (NIST) (anciennement le bureau des standards) a été fondé en 1901 pour s'occuper des technologies associées à la métrologie et aux étalons pour le commerce et l'industrie. Il dépend du Department of Commerce (DoC). Sa Direction - qui doit obligatoirement être assurée par un homme politique - est vacante en ce moment. Nous avons rencontré le Directeur adjoint James W. Turner qui est le Directeur opérationnel de l'organisme. Le NIST a 3 campus, à Gaithersburg (Maryland), Boulder (Colorado) et dans l'état de Caroline du Sud. Il gère aussi d'autres structures mixtes : le Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) avec l'université du Colorado, le Hollings Marine Laboratory (HML) avec plusieurs établissements universitaires de Caroline du Sud, et enfin les Joint Quantum Institutes et

le Center for Advanced Research in Biotechnology (CARB) avec l'université du Maryland.

Il comprend 2.800 employés (dont 88% à Gaithersburg, et 12% à Boulder), 1800 chercheurs invités, et 850 utilisateurs de leurs infrastructures (dont 50% sont étrangers). Il a reçu 3 prix Nobel de Physique.

#### Programmes en cours :

- Technology innovation program : tout récent, pour financer les universités et l'industrie sur des travaux qui intéressent le NIST ;
- Baldrige National Quality Program : prix sélectif et prestigieux accordé aux entreprises pour leur management de la qualité ;
- Holling Manufacturing Extension Partnership (MEP) : service aux PME (qualité, RH, e-commerce, organisation d'usines, développement de produits, audits d'énergie...) déployé sur le plan national avec des antennes locales ;
- Laboratoires techniques : ils sont au nombre de 9 (Physics, Nanoscale Science & engineering, Neutron research, Technology services, Information Technology, Electronics & EE, Material Science & engineering, chemical science & technology, Building & fire research, Manufacturing Engineering).

L' "American Competitiveness Initiative", lancée par le gouvernement américain, devrait doubler leur budget sur 10 ans. Elle a permis une augmentation du budget du NIST de 14 % en 2007, mais depuis, ses ressources restent stables : 434 M\$ pour les laboratoires, 160 M\$ pour les constructions, 130 M\$ provenant d'autres agences (NASA par exemple), 154 M\$ pour les services technologiques à l'industrie)

#### Advanced measurement laboratory

Le "Advanced Measurement Laboratory" (AML) a été ouvert en 2004. C'est un complexe de 5 bâtiments reliés entre eux. Une partie est souterraine et comporte des salles équipées d'un contrôle rigoureux de température, vibration, humidité, propreté, ... Il abrite le « Center for Nanoscale Science & Technology : CNST » , fondé en 2006, qui contient la centrale de nanofabrication du NIST, ainsi que 48 laboratoires de métrologie. Un autre bâtiment du site abrite le réacteur et les laboratoires du "NIST Center for Neutron Research".

Les activités du NIST sont centrées autour de la R&D et de l'innovation en métrologie. Il s'intéresse à l'amélioration de :

- i. la qualité de la vie via l'innovation en métrologie (capteurs, santé, environnement etc.),
- ii. la productivité des entreprises via le développement technologique (métrologie et contrôle de production, chimie, santé) et
- iii. le développement de marchés via les normes et standards pour le commerce (mesures de débit, sécurité de transactions, ...).

En 2009, les nouveaux sujets abordés sont :

- i. la sécurité des nanotechnologies pour l'environnement,
- ii. la métrologie et les étalons pour les biosciences,
- iii. la sécurité informatique,
- iv. les communications et les calculs optiques,
- v. l'extension du JILA.

Le personnel permanent du NIST comprend 1390 chercheurs et ingénieurs, dont 50% ont un doctorat. Sur le plan international, le NIST fournit aux industriels américains tous les éléments concernant les normes et standards d'autres pays, pour l'import et l'export de marchandises. Il travaille avec l'étranger via des accords internationaux, des projets de recherche communs, l'accueil de scientifiques étrangers (763 en 2007 dont 75 français principalement universitaires), des formations à l'attention de visiteurs de courte durée (1300

par an avec une durée de séjour de l'ordre d'une journée), et la participation à des conférences internationales. Les visiteurs scientifiques peuvent recevoir un soutien pour leurs frais de séjour, mais ne peuvent pas recevoir de salaire du NIST.

#### **B.5.b Présentation du CNST: exposé de Robert CELOTTA, Directeur.**

Le CNST a été fondé en 2006 et n'est pas complètement achevé. C'est un des 9 laboratoires du NIST : il mène des projets pluridisciplinaires sur la métrologie pour les nanotechnologies, et gère la centrale de nanofabrication qui est ouverte à l'utilisation par des extérieurs (y compris pour des étrangers).

Les caractéristiques annoncées du CNST sont sa multidisciplinarité, sa flexibilité, son personnel très sélectionné, un management sensible à toutes les opportunités, un souci du respect des délais, une facilité de collaboration - notamment à l'international, et une localisation dans l'AML qui donne un grand nombre de perspectives à ses partenaires. Au contraire des autres laboratoires du NIST (qui comprennent des divisions elles-mêmes subdivisées en groupes), le CNST n'a pas de divisions ce qui supprime un niveau hiérarchique. Les unités de base sont petites : un chef de projet (PhD en général), 2 post-doctorants, un accès à des services techniques en électronique, mécanique etc., et des chercheurs permanents qui participent véritablement aux travaux techniques. Les projets soumis sont de seulement quelques pages et sont évalués au regard des critères du NIST.

Une part importante du travail consiste à identifier les verrous métrologiques des nanotechnologies, à travailler avec des partenaires universitaires pour résoudre les problèmes en question, et à maintenir opérationnelle leur infrastructure de micro- & nano-fabrication ouverte.

#### **B.5.c Le CNST Nanofab**

Le CNST a choisi de baser son service de nanofabrication sur des permanents qui fournissent du service à 100% de leur temps. De leur côté, les chercheurs utilisateurs de technologie font de la recherche à 100% de leur temps et pas de service (contrairement aux centrales du DoE dont le personnel fait 50% de service et 50% de recherche). Nanofab comprend 1900 m<sup>2</sup> de salle blanche (dont 800 en classe 100). Le diamètre des tranches est de 4" en général et la centrale traite des substrats de Si, SiO<sub>2</sub>, SiC, composés III-V... Son utilisation est basée sur le modèle de CORNELL et du NNIN : c'est un service payant multi-utilisateurs et ouvert, dont le tarif permet de couvrir le coût total de fonctionnement de l'infrastructure (full cost recovery rate : salaires et consommables). Les utilisateurs peuvent obtenir des réductions quand il s'agit de travaux intéressant directement le NIST dans le domaine de la mesure ou de la caractérisation (tous les utilisateurs internes bénéficient donc automatiquement de ces réductions). Au NNIN, ce sont les utilisateurs académiques qui payent 50% du coût, dans la mesure où c'est la NSF qui finance une grande partie des coûts opérationnels.

Comme à Cornell, la propriété intellectuelle peut rester propriété de l'utilisateur, sauf si le personnel du NIST est mis à contribution. Pour l'utilisation du CNST Nanofab, il faut contacter le Dr. Anthony Novembre qui est le responsable de la centrale.

La centrale, opérationnelle depuis un an, compte actuellement 400 utilisateurs répertoriés (petites entreprises, chercheurs, universitaires), et n'est pas encore utilisée à pleine capacité (elle ouvre 12 heures par jour, 5 jours par semaine). Son personnel technique est de 8 personnes qui se chargent de la maintenance et de la formation des utilisateurs (réunion avec le staff, sécurité, formation sur les outils). Les réservations se font par internet (premier arrivé, premier servi), et il est possible de demander des travaux sous forme de service à distance.

Les équipements comprennent :

- une salle de technologie CMOS,
- un masqueur e-beam VISTEC 100 keV avec un diamètre de spot de 5 nm,
- des équipements de dépôt de métaux (pulvérisations DC & RF, évaporation), de matériaux biocompatibles,

- des DRIE (fluorées & chlorées) dont 2 bâtis Oxford Plasmalab spécialisé pour la gravure profonde d'oxydes et de nitrures de Silicium,
- un équipement de gravure sèche XeF<sub>2</sub>,
- des fours (LPCVD, PECVD, recuit, diffusion Bo et P même pour SiC),
- un bâti ALD (pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>,...),
- un outil de nano-impression Nanonex,
- des aligneurs de masques MA6 et MA8 de Karl Süss, et un équipement Zeiss d'écriture ebeam.

Les programmes de recherche sont choisis avec les conseils de scientifiques internationaux prestigieux, dont certains sont recrutés ensuite (mais seulement les citoyens américains peuvent être recrutés). Ils sont centrés sur :

- l'électronique (dispositifs, architectures, interconnexions, post-CMOS),
- la nanofabrication (Top-down et bottom-up),
- l'énergie (conversion, stockage, transport) avec une recherche de complémentarité avec d'autres laboratoires du NIST.

Principales Collaborations : Nanoelectronics Research Initiative, Université Albany (contrat avec LEICA et UAlbany pour améliorer la lithographie ebeam), Georgia Tech (sur la nano-construction), ...

Les thèmes de recherche sont les suivants :

- Atomic scale characterization & manipulation,
- Laser-atom manipulation (exemple de la mise au point d'une nouvelle source d'ions produits à partir d'atomes froids, pour FIB avec FEI),
- Directed assembly,
- Nanomagnetic imaging,
- Nanophotonics,
- Nanoscale transport,
- Nanoplasmonics,
- Nanomagnet dynamics, NEMS,
- Control of nanoscale systems, MEMS .....

Le NIST accueille de façon régulière des professeurs (en leur payant leur salaire d'été), et en hébergeant du même coup (à plein temps, cette fois) une partie de leur équipe de recherche.

#### **B.5.d Exposé de Henri LEZEC : exemples de recherche en nano plasmonique.**

Ces travaux sont centrés sur les composants photoniques et les méta-matériaux. Une forte activité sur les plasmons de surface vise (i) la modification de propagation par variation non-linéaire d'indice, (ii) les effets photovoltaïques exaltés par plasmons de surface, et (iii) les meta-matériaux plasmoniques.

Un exemple de guide d'onde couplé à des plasmons de surfaces a été fabriqué pour montrer les effets de réfraction négative (il s'agit d'un guide large Ag/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ag multimode couplé à l'extérieur par une fente de 400 nm de large, et couplé en bout à un guide monomode d'épaisseur 50 nm Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ag, puis de nouveau à un guide Ag/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ag multimode couplé à l'extérieur par une fente de 400 nm de large. La réfraction négative est clairement démontrée sur ce composant. Un deuxième exemple consiste à fabriquer un méta-matériau (micro-plaque de 120 couches Ag/Si montée sur un cantilever, et éclairée à la sortie d'une fibre) pour démontrer les effets de pression de radiation négative (le miroir est attiré par la lumière au lieu d'être repoussé).

#### **B.5.e Exposé de Matthew Mc MAHON : Orthogonal tracking microscopy for nanofabrication research.**

Ce travail consiste à faire de l'imagerie de déplacements de nanoparticules dans des liquides. L'objectif est le contrôle de procédés d'assemblage à l'échelle nanométrique. Avec une caméra rapide, et des particules

fluorescentes, on peut voir avec une précision de 20 nm le centre de gravité de particules sub-micrométriques (qui ne sont pas résolues). Il est montré en plaçant les particules dans une structure en V en silicium jouant le rôle de micro miroir qu'il est possible de générer 2 images qui suivent les positions verticales et horizontales de la particule.

#### **B.5.f Exposé de Marc STILES : Condensed matter theory.**

L'exemple qui nous est présenté concerne ses travaux théoriques sur les MRAM. En particulier, le problème est de trouver des moyens d'écrire dans des MRAM sans modifier l'état des mémoires voisines.

#### **B.5.g Visite d'un STM basse température**

Un STM à basse température placé dans un environnement ultra contrôlé, permet d'observer ou de construire des structures de couches atomiques et moléculaires à la température de l'hélium liquide. En particulier, une étude de graphène réalisé en éliminant le silicium de surface par recuit de substrats de SiC nous est présentée. Les conditions d'obtention de couches uniques ou de bicouches ont été étudiées, et le STM a permis de tester le couplage entre les 2 feuilles de graphène.

#### **B.5.h Visite des travaux d'optique atomique pour réaliser des sources d'ions par voie optique**

Des atomes (de chrome dans le cas qui nous a été montré) sont piégés optiquement, pour former sous vide une boule de diamètre de 30 microns à quelques milli Kelvins. Ils sont ensuite ionisés par un laser annexe, puis accélérés entre 2 plaques, pour former un faisceau pratiquement collimaté. Une optique électronique permet ensuite de les focaliser sur un très faible diamètre. Il est ainsi possible de faire des sources d'ions avec de nouveaux atomes pour des applications aux FIB.

#### **Commentaires :**

Sous l'impulsion de l'administration fédérale, le NIST s'est doté à Gaithersburg d'un laboratoire entièrement dédié aux nanotechnologies, et d'une centrale de technologie récente qu'il a organisée suivant le modèle du NNIN bien qu'elle ne fonctionne pas en 24/24 et 7/7 et que l'activité n'y semble pas aussi intense. Cette centrale est encore en cours d'achèvement, mais elle est très raisonnablement dotée comme l'ensemble des centrales que nous avons visitées. Les programmes de recherche du CNST ne semblent pas vraiment spécifiques d'applications à la métrologie.

## C. CONCLUSION GENERALE ET COMMENTAIRES

Cette visite a été une excellente opportunité d'améliorer notre connaissance du réseau de centrales de nanofabrication mis en place aux Etats-Unis pour accompagner le développement des nanotechnologies. L'idée directrice consistant à diriger les financements publics de R&D vers un nombre limité de sites est analogue au principe mis en œuvre dans le réseau français "RTB".

Le centre d'Albany, totalement orienté vers une activité de développement, se vit comme une addition de collaborations étroites mais décorrélées (propriété intellectuelle oblige) avec des grosses et petites entreprises. Il a des similarités avec les centres européens comme le LETI à Grenoble ou l'IMEC en Belgique, mais se démarque fortement des autres centrales que nous avons visitées qui ont une vocation académique et suivent un modèle d'organisation piloté par la NNI. Ce réseau de la NNI est ainsi très similaire au réseau académique français RENATECH. Un élément de la différenciation entre les modèles NNI et Albany est sur le spectre des ressources humaines : il y a environ 2000 chercheurs ingénieurs présents sur le site d'Albany dont seulement 90 sont des chercheurs de l'Université.

Contrairement à la politique américaine des années 1990, qui tendait à développer seulement quelques centres offrant un service de fabrication "à distance" pour l'ensemble des utilisateurs académiques américains, l'objectif actuel de la NNI consiste à créer un maillage dense du territoire : le nombre de sites envisagés est plus grand (entre 10 et 20), mieux réparti sur le territoire américain, et surtout destiné à accueillir des utilisateurs - tant académiques qu'industriels - qui se chargent eux-mêmes de la fabrication. Cette approche permet de développer une véritable "culture" des nanotechnologies à l'échelle nationale, en maximisant le nombre de personnes qui seront à l'aise dans une salle blanche, et qui sauront en maîtriser les principaux outils en toute autonomie. Le système profite aussi largement aux petites entreprises qui bénéficient d'un accès aisé à des technologies de pointe, en ne supportant que très partiellement leur charge. Nous avons pu constater que les investissements réalisés sont généralement de grande envergure (bâtiments de qualité, équipements de salle blanche récents).

Les sites américains présentent donc des caractéristiques semblables à celles du réseau français RTB, et affichent clairement un certain nombre de principes :

- une priorité sur la disponibilité des équipements (24h/24) (7j/7),
- une volonté d'ouverture à tous types d'utilisateurs (y compris les industriels), sans sélection de projets, sans utilisateur prioritaire, et avec un temps d'accès rapide,
- une gestion des projets basée sur l'autonomie des utilisateurs, obtenue par une formation appropriée, mais avec la possibilité de faire du travail d'assistance ou de service payant par l'équipe technique,
- une équipe technique de permanents qui assurent le fonctionnement de la plateforme, l'accueil et la formation des utilisateurs, et le cas échéant l'assistance ou le service de sous-traitance.
- un accès payant pour tous les utilisateurs : pour les utilisateurs académiques sur la base du coût de fonctionnement marginal, mais sans prise en compte du coût d'investissement et d'amortissement des équipements et de l'infrastructure, et un large subventionnement du fonctionnement qui couvre en particulier les salaires de l'équipe technique; pour les utilisateurs industriels, la facturation est établie sur la base du coût total ou du coût du marché,
- un effort de formation constant pour assurer un flux de primo-arrivants en salle blanche
- un effort de séduction des étudiants en masters (sélectionnés par "concours") en ouvrant les centres à des stages d'été de 10 semaines

- une complémentarité avec d'autres plateformes (élaboration de matériaux, caractérisation, simulation, interface bio, électronique moléculaire,...) qui sont soit à proximité de la plateforme de nanotechnologie, soit elles en font partie.

S'il est difficile de transposer à l'Europe l'ensemble du système mis en place par nos homologues américains, il paraît néanmoins judicieux de s'inspirer de la politique d'ouverture des centrales du réseau NNI, qui devrait permettre de produire des résultats remarquables au niveau national. Ainsi, après une phase de mise à niveau absolument indispensable, le réseau RTB est maintenant en position d'offrir les mêmes avantages que le réseau de la NNI. Si son financement est pérennisé, notre réseau RTB peut s'avérer extrêmement efficace à l'avenir pour diffuser largement la culture des nanotechnologies, tout en maîtrisant globalement les coûts induits par cette opération.

Enfin, les échanges réciproques approfondis qui ont caractérisé ces visites permettent d'envisager des interactions plus étroites, qui devraient conduire à un renforcement des échanges de scientifiques et d'ingénieurs entre les centres français et américains de nanotechnologies.

**Une dernière remarque:**

Aux Etats-Unis, les Nanotechnologies trouvent des applications pratiques au quotidien : la NANOCAR (photo prise à ITHACA lors de la mission).



**Contacts**

- [jean-yves.marzin@lpn.cnrs.fr](mailto:jean-yves.marzin@lpn.cnrs.fr)
- [alain.cappy@iemn.univ-lille1.fr](mailto:alain.cappy@iemn.univ-lille1.fr)
- [sanchez@laas.fr](mailto:sanchez@laas.fr)
- [labachel@femto-st.fr](mailto:labachel@femto-st.fr)
- [engin.molva@cea.fr](mailto:engin.molva@cea.fr)
- [alain.fontaine@grenoble.cnrs.fr](mailto:alain.fontaine@grenoble.cnrs.fr)
- [Didier.Theron@IEMN.univ-lille1.fr](mailto:Didier.Theron@IEMN.univ-lille1.fr)