

# Sciences Physiques USA

## Nanosciences, Microélectronique, Matériaux

Mission pour la Science et la Technologie



FEVRIER 2006

## Sommaire

---

### **Synthèse des Nanotubes de Carbone Recherche et Production Industrielle aux USA**

#### I Introduction

- I.1 Classification
- I.2 Propriétés

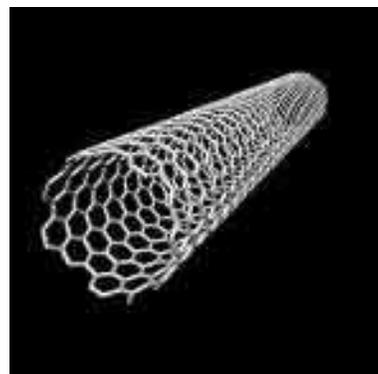
#### II Méthodes de production

- II.1 Méthodes Haute Température
- II.2 Méthodes CVD

#### III Production industrielle aux Etats-Unis

#### IV Principaux groupes de recherche sur la synthèse des nanotubes aux Etats-Unis

#### V Conclusion



### **La Recherche Américaine : Vers un Modèle Ouvert Basé sur la Collaboration**

#### I Une nouvelle vision de la R&D

- I.1 Les facteurs de changements
- I.2 Un processus d'innovation ouvert

#### II Le Berkeley Wireless Research Center

- II.1 Un modèle de collaboration industrie-université
- II.2 Le point de vue d'un partenaire industriel

#### III Conclusion



Nous inaugurons avec ce numéro une nouvelle formule pour notre publication qui de mensuelle devient trimestrielle. Nous souhaitons désormais traiter essentiellement des sujets en profondeur ; les actualités et les brèves, qui restent évidemment importantes à nos yeux, sont regroupés dans le Bulletin Electronique, une des autres publications de la Mission pour la Science et la Technologie. Notre souci est d'apporter une véritable valeur ajoutée dans l'information que nous diffusons. Notre présence aux Etats-Unis nous offre de nombreuses opportunités de contacts directs avec les universités et les chercheurs américains. C'est cette vision et cette " connaissance du terrain " que nous essayons de retransmettre dans les dossiers traités. Les exemples cités dans ce numéro reprennent bien souvent des contacts et des interlocuteurs que nous avons eu la chance de rencontrer dans leurs laboratoires à plusieurs reprises : le BWRC à Berkeley, H. Day à Stanford, J. Tour à Rice...

Cette nouvelle lettre contient deux dossiers. Le premier sur la production de nanotubes de carbone montre que les nanotechnologies débouchent déjà sur des applications industrielles. Il explique comment les laboratoires américains se sont mobilisés sur ces thématiques d'avenir et comment les dispositifs de transfert de technologies, mis en place dans les universités, ont permis la création de petites entreprises innovantes qui se sont lancées dans la production industrielle de nanotubes.

Le deuxième dossier traite des évolutions dans l'organisation de la recherche américaine, ou comment les entreprises souhaitent désormais interagir avec les laboratoires académiques. Nous présentons en particulier l'exemple de Berkeley, université bien connue pour son esprit d'ouverture, et qui a mis en place des moyens originaux pour collaborer avec les entreprises. Ce modèle repose d'abord sur l'excellence académique : c'est évidemment la qualité des recherches menées qui permettront à l'université d'imposer ses vues à des partenaires privés, avec le soucis de diffuser la connaissance de façon la plus large.

Ces deux dossiers sont complémentaires parce qu'ils permettent dans les deux cas de constater le dynamisme de la recherche américaine. En dépit des problèmes qu'elle connaît actuellement (baisse des financements fédéraux, désaffection des études scientifiques, concurrence internationale accrue...) les universités et les laboratoires américains continuent d'innover pour améliorer leur organisation, accroître l'efficacité de leur travaux et mieux répondre aux besoins technologiques des entreprises et de la société. Le transfert de technologies est une pratique maintenant généralisée dans toutes les universités d'envergure. Il convient cependant de relativiser l'importance des offices de transfert dans la mesure où seul un nombre réduit de technologies génère des revenus pour les universités. Ces bureaux de transfert de technologies installés dans les universités ont d'abord pour mission de diffuser la connaissance et de rendre les nouvelles technologies accessibles au plus grand nombre. Ils privilégient en particulier l'attribution de licences non exclusives pour avoir plus d'impact. Enfin le financement de la recherche par les entreprises, notamment à travers des contrats de recherche ou l'achat de licence, reste là aussi faible en regard du financement public assuré notamment par les agences fédérales.

Nous essayerons dans les numéros à venir de garder un équilibre entre des sujets scientifiques et technologiques et ceux qui touchent plus à l'organisation de la recherche et aux politiques américaines. L'objectif est de couvrir un spectre large de sujets pour décrire au mieux le paysage scientifique américain.

Bonne lecture,

*Christophe Lerouge,  
Attaché pour la Science et la Technologie  
San Francisco*

# Synthèse des Nanotubes de Carbone

## Recherche et Production Industrielle aux USA

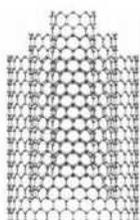
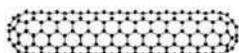
### I. Introduction

La découverte des nanotubes de carbone en 1991 par le japonais Sumio Iijima lors de l'étude de la synthèse des fullerènes (C<sub>60</sub>) a permis de mettre à jour une nouvelle forme de carbone. Un nanotube de carbone est une feuille de graphite enroulée sur elle-même d'un diamètre de 0.4 à quelques nanomètres et d'une longueur pouvant atteindre quelques centimètres. Sa structure unique lui confère des propriétés exceptionnelles qui ont motivé une intense recherche scientifique. Les nanotubes de carbone présentent des propriétés mécaniques, électriques, thermiques et chimiques hors du commun : 100 fois plus résistant que l'acier, meilleur conducteur que le cuivre, conductivité thermique comparable à celle du diamant, propriétés électroniques étonnantes. De telles propriétés permettent d'envisager plusieurs applications telles que des dispositifs à émission à effet de champ, des dispositifs électroniques, le renforcement de matériaux composites, des polymères conducteurs, des capteurs, etc.

Le seul obstacle au développement de toutes ces applications technologiques à un niveau commercial est la faible capacité et le coût élevé de production des techniques conventionnelles (CVD, arc électrique et ablation laser) de même que le manque de compréhension des procédés de synthèse des nanotubes de carbone. Cependant les progrès réalisés sur les méthodes de production des nanotubes ont été extrêmement rapides et il existe une recherche très active dans ce domaine qui devrait conduire rapidement à une baisse des prix.

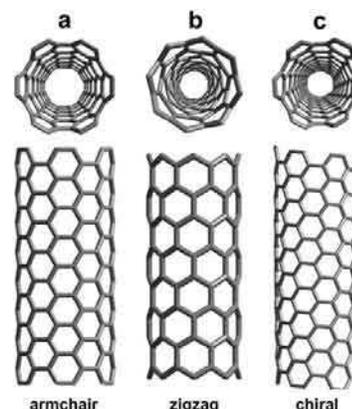
#### I.1 Classification

Les nanotubes de carbone existent sous de nombreuses formes dont dépendent leurs propriétés. Premièrement les nanotubes se divisent en deux catégories : les nanotubes mono-parois (SWNT pour Single Wall NanoTube) et les nanotubes multi-parois (MWNT pour Multi Walls NanoTube) (Fig. 1).



**Figure 1 - Nanotube monoparoi (SWNT), extrémités fermées et nanotube multi-parois (MWNT), extrémités ouvertes.**

Les MWNTs sont constitués d'un emboîtement de plusieurs cylindres de graphite, coaxiaux et concentriques, séparés les uns des autres d'environ 0.34nm [1]. Les SWNTs sont constitués d'un seul cylindre. Des propriétés particulières au SWNT proviennent de leur perfection cristalline et de leur unidimensionnalité. Ils peuvent être métalliques ou semi-conducteurs suivant l'orientation des hexagones par rapport à l'axe du nanotube (Fig. 2) et du diamètre. Les MWNTs sont essentiellement métalliques car la conduction du courant se fait dans le cylindre de graphite le plus extérieur qui a un large diamètre. Les SWNTs ont également une résistance mécanique le long de l'axe bien meilleure que les MWNTs.



**Figure 2 - Les SWNTs présentent une variété de structures correspondant aux différentes façons d'enrouler une feuille de graphite. Chaque structure a une chiralité et un diamètre différent. Dans la structure « armchair » les lignes verticales d'hexagones sont parallèles à l'axe vertical. En zigzag les lignes d'hexagones sont perpendiculaires à l'axe. Le cas chiral est un cas intermédiaire où les lignes s'enroulent en spirale autour du nanotube. Les nanotubes « armchair » ont un caractère métallique tandis que les « zigzags » sont semi-conducteurs. Les chiraux peuvent présenter l'une ou l'autre des propriétés électroniques.**

#### I. 2 Applications

Physiciens, chimistes et biologistes ont imaginé et proposé de nombreuses applications pour les nanotubes de carbone qui exploitent leurs propriétés uniques. En voici quelques exemples.

##### I.2.1 Emetteurs à effet de champ

En tant que structure à exceptionnel rapport longueur sur diamètre, d'une excellente conductivité et d'un diamètre nanométrique, les nanotubes sont de très bons candidats pour jouer le rôle de canons à électrons dans les technologies d'affichage, les tubes à rayons X, la lithographie et la microscopie de proximité. Les extrémités des nanotubes, très fines et réduites à une poignée d'atomes, ont le meilleur pouvoir d'émission sous champ électrique qui soit actuellement [1].

Des sources portables de rayons X avec une cathode émettrice en nanotube sont déjà commercialisées pour des applications médicales et industrielles. Xintek, une start-up de University of North Carolina, fait partie des sociétés pionnières

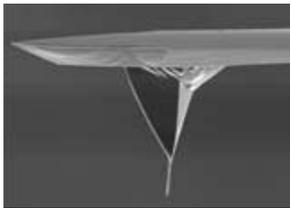
dans ce domaine [2].

Des prototypes d'écrans plats à base de nanotubes de carbone ont été présentés par plusieurs compagnies récemment. En septembre 2005, Applied Nanotech (Austin, Texas) [3], en collaboration avec six firmes japonaises d'électronique, a dévoilé un prototype de télévision de 65 cm de diamètre utilisant les nanotubes comme canons à électrons. En mai 2005 Motorola avait déjà présenté un prototype d'écran couleur à nanotubes de 10 cm de diamètre que la firme a baptisé NED (Nano Emissive Display) (Fig. 3). Plusieurs constructeurs asiatiques ont également développé des prototypes. La technologie pourrait concurrencer les technologies actuelles (LCD et plasmas) sur le marché des très grands diamètres d'ici quelques années.



**Figure 3 - Ecran NED par Motorola qui utilise les nanotubes comme source d'électrons.**

La finesse des extrémités des nanotubes en fait des pointes idéales pour les microscopies de surface (microscopie à effet tunnel, à force atomique) car elles permettent d'améliorer considérablement le pouvoir de résolution de ces instruments qui dépend du rayon de courbure de la pointe. La figure 4 montre un dispositif où un nanotube multi-feuillet a été collé à l'extrémité d'une pointe classique. De telles pointes sont déjà disponibles commercialement [4].



**Figure 4 - Pointe d'AFM en nanotube montée sur un cantilever**

### 1.2.2 Composants électroniques

Il est prématuré et hasardeux de prétendre aujourd'hui que l'électronique de demain utilisera les nanotubes comme briques de base dans les circuits mais ils sont d'ores et déjà disponibles pour apprendre à travailler avec des composants nanométriques, les manipuler, étudier leur comportement physique et chimique, concevoir des dispositifs. Des dispositifs tels que des transistors à effet de champ ou diodes ont pu être réalisés avec des nanotubes. De nombreuses universités (Harvard, Cornell, Purdue, UCLA,...) et compagnies (IBM, HP,...) travaillent sur des transistors dont la partie active est un nanotube.

Les nanotubes sont aussi étudiés pour leur intégration dans des dispositifs électroniques en tant que nanofils de connection. L'équipe de Charles Lieber à Harvard University est l'une des plus actives dans le domaine des nanofils (nanowires) [5].

Des dispositifs à mémoire à base de nanotube sont

aussi à l'étude. La start-up américaine Nantero [6] travaille au développement d'une mémoire NRAM (Nanotube-based/ Nonvolatile RAM) qui allierait, selon ses inventeurs, tous les avantages des mémoires actuelles (DRAM, SRAM, Flash) sans les inconvénients (non volatilité, faible consommation, haute capacité).

### 1.2.3 Capteurs

Les propriétés électroniques des nanotubes sont très sensibles à leur environnement, notamment aux molécules adsorbées. Cette haute sensibilité peut être avantageusement utilisée pour des capteurs chimiques ou biologiques. Des capteurs sont aussi proposés pour le contrôle des matériaux car la déformation structurelle du nanotube entraîne un changement de conductivité.

### 1.2.4 Matériaux structurels

Le niveau de ses performances mécaniques fait du nanotube la meilleure fibre nanométrique qui soit, bien supérieure au kevlar ou à l'acier et qui pourrait trouver une application dans le renforcement mécanique de matériaux composites. Dans ce domaine encore, il est prématuré d'annoncer des applications précises mais un certain nombre d'études ont démarré dans les domaines de l'aéronautique et de la médecine notamment. Il est clair que celles-ci ne devraient pas déboucher avant 10 - 15 ans et nécessiteront la mise en œuvre de moyens de production à grande échelle de nanotubes.

Deux axes de recherche sont aujourd'hui en développement :

- Des mélanges de nanotubes dans des matrices de polymères ou de céramiques
- L'utilisation de nanotubes alignés de façon ordonnée. Ceci permet d'obtenir des fibres de carbone conservant à l'échelle micrométrique les avantages des nanotubes.

Cependant il existe déjà sur le marché plusieurs produits incorporant des nanotubes de carbone pour un renforcement structurel. NanoDynamics [7], basé à New York, commercialise des balles de golf incorporant des nanotubes qui leur confèrent une meilleure tenue de trajectoire (Fig. 5). La société californienne d'équipements sportifs Easton propose des battes de baseball et des cadres de vélo renforcés aux nanotubes de carbone [8].



**Figure 5 - La balle de golf selon NanoDynamics : Une des premières applications commerciales des nanotubes comme matériaux structurels**

### 1.2.5 Electrodes et stockage d'énergie

Une autre application intéressante des nanotubes est la mise au point d'électrodes pour batteries électrochimiques. Des techniques existent pour produire des 'forêts' de nanotubes comme les poils d'une brosse très dense. Cette disposition

présente une large surface spécifique qui augmentent la vitesse de réaction aux électrodes. Cette même propriété alliée à la bonne conductivité, la stabilité chimique et la faible densité massique des nanotubes sont des atouts pour des applications de stockage d'énergie [9].

### 1.2.6 Nanocontainer

La cavité intérieure du nanotube invite à l'utiliser comme 'nanocontainer' pour stocker ou protéger des molécules. Des propositions pour le stockage d'hydrogène dans les piles à combustibles ont été faites et certaines applications sont envisagées en chimie du vivant pour le transport de molécules.

Les actions pour la recherche sur le stockage de l'hydrogène sont coordonnées par le *Department of Energy* (DoE) qui a mis en place le *Center for Carbon-based Hydrogen Storage* piloté par le *National Renewable Energy Laboratory* et regroupant 10 universités et la société Air Products [10]. Rice University, Duke University et Oak Ridge National Laboratory sont en particulier impliqués dans l'utilisation de nanotubes de carbone pour le stockage d'hydrogène [11]. Une part importante des recherches est dédiée à la mise au point de techniques de production permettant d'obtenir des SWNTs avec un diamètre contrôlé pour optimiser le stockage de l'hydrogène.

Cette même propriété est étudiée pour le transport de médicaments dans l'organisme. La molécule active est enfermée dans la cage en nanotube (ou fullerène) avant d'être délivrée à la cible. Les nanotubes peuvent être facilement fonctionnalisés par greffage chimique à leur surface afin de les rendre solubles et spécifiques à une cible.

### 1.2.7 Quantum Wire

En avril 2005, un contrat de 11 millions de dollars a été signé entre Rice University et la NASA pour le développement d'un câble électrique réalisé en nanotubes de carbone [12]. Les chercheurs ont pour mission de produire un prototype d'un mètre de long d'ici 2010. Avec une conductivité électrique plusieurs fois supérieure au cuivre et une densité massique 6 fois plus faible, le « Quantum Wire » pourrait révolutionner le transport de l'énergie électrique. Le défi consiste à produire de longs nanotubes métalliques exempts d'impuretés et de défauts. A l'heure actuelle aucune technique ne permet d'obtenir exclusivement des nanotubes de type métallique [13].

### 1.2.8 Conclusion

Il est évident que pour ces diverses applications, différentes morphologies sont nécessaires. Par exemple, une pointe de microscope à champ proche nécessite un SWNT unique avec un important rapport de forme, tandis que le renforcement de polymères nécessite une production de masse de nanotubes plus ou moins ordonnés. La croissance de nanotubes pour la fabrication d'un écran plat requiert un espacement régulier et un alignement vertical parfait des nanotubes. Pour arriver à cette variété, il existe plusieurs techniques de synthèse des nanotubes.

## II Méthodes de synthèse des nanotubes de carbone

Les méthodes de production des nanotubes peuvent être divisées en deux familles : les procédés haute température et les procédés moyenne température. Les méthodes utilisant un arc électrique et ou une ablation laser opèrent à 2000-3000K tandis que les techniques de dépôts chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Deposition) opèrent autour de 1000K ou moins. Au début des années 90, la plupart des travaux ont été réalisés sur des nanotubes produits par décharge électrique ou ablation laser en raison de la meilleure qualité des nanotubes obtenus (cristallinité et forme). Depuis 98 des progrès substantiels ont été réalisés dans le développement de la CVD pour en faire une technologie très bien contrôlée. Sa flexibilité et la possibilité d'un développement à l'échelle industrielle en font aujourd'hui la méthode la plus répandue.

### II.1 Méthodes Haute Température [14]

#### II.1.1 Arc électrique

Lors de son expérience qui conduisit à la découverte des nanotubes de carbones, S. Iijima utilisa un arc électrique généré par une décharge en courant continu entre deux électrodes de graphite, le tout dans une atmosphère d'argon. Il obtint des MWNTs dans la suie produite par la décharge. Plus tard des SWNTs ont été synthétisés par cette technique en incorporant dans les électrodes des particules de catalyseur métallique .

#### Principe et description

Une décharge électrique est générée entre deux électrodes de graphite placées en vis-à-vis dans une enceinte confinée sous une pression partielle d'He ou d'Ar (typiquement 600 mbar) (Fig. 6). L'arc électrique chauffe le graphite jusqu'à 6000°C. A cette température les atomes de carbone du graphite se subliment et sont éjectés du solide pour former un plasma. Avant de se déposer sur les parois plus froides de la cathode, certains de ces atomes diffusent pour former des nanotubes.

Le type de nanotube obtenu dépend fortement de la présence de métaux catalyseurs. Si de petites quantités de métaux de transition tels que Fe, Co ou Ni sont introduits dans la cible en graphite, les SWNTs seront les produits dominants. Sans ces particules métalliques, la production de MWNTs est favorisée .

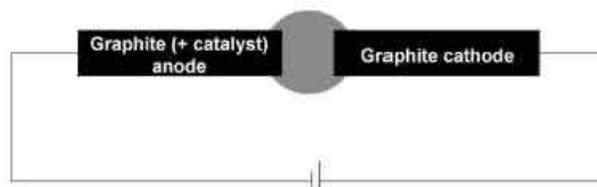


Figure 6 - Principe de la méthode de l'arc électrique

II.1.2 Ablation laser

C'est la méthode historique qu'utilisa R. Smalley pour produire les premiers fullerènes, balles de carbone nanométriques (C60) et proches cousins des nanotubes. Dans un tube de quartz chauffé à 1200°C, un bloc de graphite compressé fut vaporisé par un intense faisceau laser pulsé. Les fullerènes formés furent ensuite identifiés dans le dépôt de carbone. Plus tard la même technique fut appliquée à la production de nanotubes.

Principe et description

La méthode est très proche de celle de l'arc électrique (sublimation de graphique dans une atmosphère de gaz rare) et produit les mêmes produits avec des cristallinités similaires. Le faisceau laser focalisé sur le graphique peut être soit pulsé soit continu. Le four dans lequel est placée la cible en graphique sert à créer un gradient de température le long du flux d'argon (Fig. 7). Les nanotubes sont formés dans la phase vapeur après sublimation du graphique et sont transportés par le flux d'argon pour aller se condenser sur le collecteur en cuivre placé à l'extrémité du four et refroidi à l'eau. Selon les conditions expérimentales, des SWNTs ou des MWNTs sont présents dans la suie amassée au collecteur. Comme pour la méthode précédente, l'introduction de catalyseurs métalliques (Fe, Ni, Co) favorise la production de SWNTs .

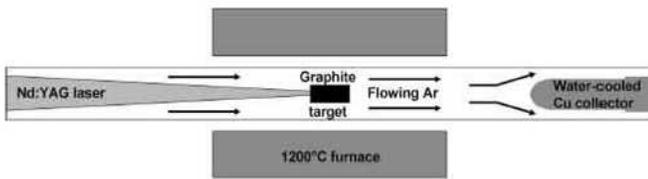


Figure 7 - Principe de la technique de l'ablation laser

Les méthodes hautes températures souffrent de plusieurs limitations qui les rendent difficilement utilisables pour certaines applications :

- La purification nécessaire pour extraire les nanotubes des produits obtenus nécessite des méthodes chimiques qui compliquent le processus.
- Les nanotubes ne sont pas directement synthétisés sur un substrat et doivent être collectés et redéposés sur le support choisi.

II.2 Méthodes CVD [15]

Les progrès réalisés ces dernières années dans la technologie CVD catalytique permettent de synthétiser des SWNT/MWNTs de bonne qualité, alignés horizontalement ou verticalement, individuellement ou en masse, de diamètre et de longueur contrôlés et directement sur différents types de substrats. D'autre part la plupart du temps les nanotubes ainsi produits ne nécessitent pas de purification.

II.2.1 Mécanisme de croissance

Trois éléments caractérisent la recette de base d'une croissance CVD catalytique :

- Nano particules métalliques catalytiques (en général Fe, Co ou Ni)
- Source de carbone gazeuse (hydrocarbures ou monoxyde de carbone)
- Chaleur apportée par le chauffage dans un four

Le mécanisme de croissance des nanotubes est encore mal connu et sujet à controverses. Il est généralement postulé que le processus commence par la décomposition catalytique de l'hydrocarbure sur la face de la nanoparticule métallique exposée au flux gazeux (Fig. 8). Cette décomposition conduit à la dissociation de l'hydrogène et du carbone qui se dissout dans la nanoparticule. Le carbone dissout diffuse à travers la particule et précipite de l'autre côté pour former un nanotube ou un filament de carbone selon la taille du catalyseur. Ce processus s'arrête lorsque l'approvisionnement en carbone est stoppé ou lorsque la catalyse ne se fait plus (par exemple lorsqu'un dépôt de carbone entourant la particule empêche le gaz d'y accéder).

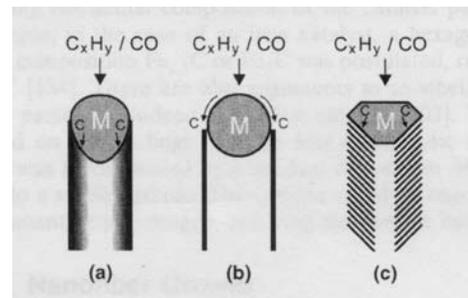


Figure 8 - La décomposition de l'hydrocarbure sur la particule métallique conduit à la diffusion du carbone à travers (a) ou autour (b) du catalyseur. La précipitation du carbone sur la face antérieure forme une structure qui peut être un nanotube SWNT/MWNT ou des plaques graphitiques selon la taille et la forme de la particule catalyseur.

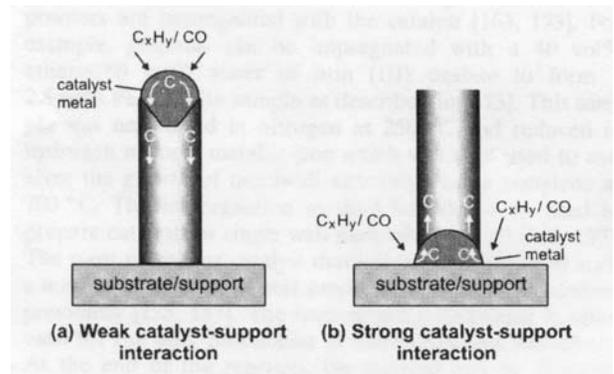


Figure 9 - Deux modes de croissance sur un substrat : croissance par la pointe (tip growth) ou croissance par la base (base growth). Le type de croissance dépend de l'interaction support/catalyseur.

Lorsque la croissance a lieu sur un support, il existe deux modes de croissance selon l'interaction du catalyseur avec le substrat. Si l'interaction est faible, le nanotube

va croître sous la particule métallique et soulever celle-ci au dessus de la surface (Fig. 9) (croissance de type « tip growth »). Si l'interaction est forte, le nanotube croît au dessus du catalyseur qui reste fixé au substrat (croissance de type « base growth »).

### II.2.2 Sélection des paramètres

Fe, Co et Ni sont les catalyseurs habituellement utilisés mais la formation de nanotubes est aussi possible avec des alliages de ces métaux ou d'autres métaux tels que Mo ou Cu.

Sous des conditions idéales, les nanotubes produits devraient être perpendiculaires à la surface et sans défauts. En pratique les défauts de cristallinité sont plus fréquents en CVD qu'avec les méthodes hautes température. Il suffit en principe d'augmenter la température pour diminuer le nombre de défauts dont la conséquence est de tordre les nanotubes et d'en modifier les propriétés électroniques. Cependant une trop haute température conduit à la décomposition thermique du gaz en carbone amorphe nuisible à la réaction. C'est donc un compromis entre ces deux paramètres qu'il faut trouver.

Le choix de la source de carbone affecte la croissance des nanotubes. Le méthane et le monoxyde de carbone sont habituellement utilisés pour la croissance de SWNTs tandis que des hydrocarbures tels que l'acétylène, l'éthylène et le benzène sont typiquement utilisés pour faire croître les MWNTs.

### II.2.3 Préparation du catalyseur

La première étape de la synthèse consiste à préparer le catalyseur sur le substrat et il est important de se rappeler que la taille des nanoparticules détermine approximativement le diamètre final du nanotube. D'autre part, pour certaines applications il est nécessaire de faire croître le nanotube à des emplacements bien précis d'où l'importance de contrôler la disposition des catalyseurs sur le substrat. Plusieurs technologies sont disponibles :

- Catalyseur humide : une solution liquide (généralement des sels) contenant le catalyseur est appliquée sur le substrat. Cette méthode est utile pour enduire des surfaces non planes tel que des fils ou des pointes.
- Couche mince métallique : un film mince métallique (quelques nanomètres) est déposé sur la surface par CVD. Lors du chauffage, la couche se fracture et coalesce en nanoparticules qui servent alors de catalyseur à la croissance de nanotubes.
- Couche métallique épaisse : Des techniques de traitement de surface, telle que plasma etching permettent de créer des irrégularités sur la couche où le gaz se décompose et les nanotubes croissent
- Colloïdes : des particules métalliques colloïdales peuvent être utilisées pour catalyser la réaction sur le substrat
- Technique sol-gel : des sol-gels imprégnés de catalyseurs métalliques ont une grande surface spécifique, une grande porosité et une faible densité.

Ces propriétés optimisent le rendement de la synthèse de nanotubes.

- Catalyseur non supportés/flottants : c'est la méthode couramment utilisé pour un production de masse par CVD. Aucune purification n'est nécessaire pour récupérer les nanotubes d'un substrat. Les nanoparticules catalytiques sont directement injectées dans la chambre CVD.

### II.2.4 Chambre de réaction

La production de nanotubes de carbone se déroule dans un four horizontal ou vertical. Dans sa forme la plus simple, le four est un tube en quartz chauffé dans lequel sont placés le substrat et les catalyseurs. Les gaz participant à la réaction s'écoulent le long du tube et au dessus du substrat/catalyseur. Lorsque les échantillons sont introduits dans le four, ce dernier est d'abord nettoyé par un flux de gaz inerte tel que l'argon. Dans cette atmosphère inerte le four est chauffé jusqu'à la température de croissance. De l'hydrogène est souvent ajouté pour réduire les particules catalytiques. Lorsque la température de croissance est atteinte, le gaz carboné est introduit et la réaction peut commencer. La température idéale doit être la plus haute possible pour obtenir une haute cristallinité sans pour autant atteindre la décomposition thermique du gaz qui produirait des dépôts de carbone amorphe gênant la réaction.

La production de masse de nanotubes est en général réalisée dans un four vertical. Dans cette configuration le catalyseur et la source de carbone (gaz) sont directement injectés à l'extrémité supérieure du four. Les nanotubes sont formés durant le temps de chute et sont collectés au fond de la chambre.

### II.2.5 Exemples de technologies CVD

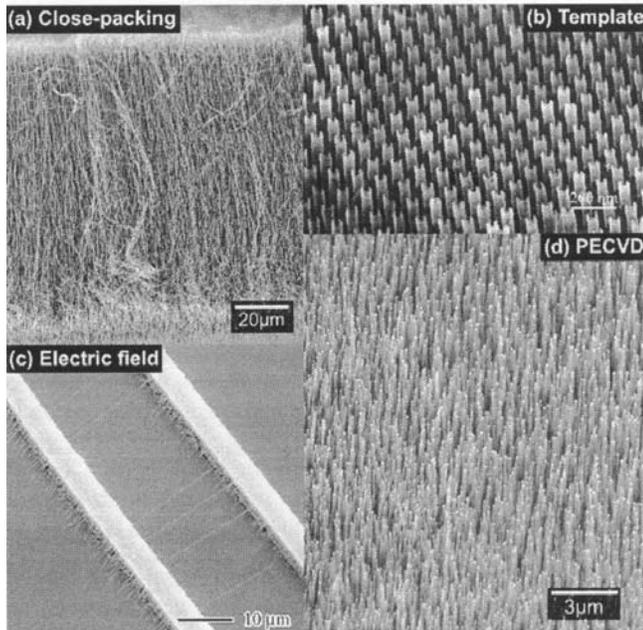
#### Croissance de tubes alignés

Plusieurs technologies ont été développées pour faire croître les nanotubes de manière ordonnée et alignée sur un substrat. Sur des substrats où la densité de nanotubes est très élevée il existe un phénomène d'auto-alignement. Une « forêt » dense et resserrée de nanotubes a en effet tendance à croître verticalement du fait des forces de Van de Waals qui s'exercent entre nanotubes voisins. Toutefois ces nanotubes resserrés ne sont généralement pas parfaitement droits mais présentent de légères ondulations (Fig. 10.a).

Lorsque les applications nécessitent un espacement plus important entre les nanotubes (Field Emission Display) des moules de croissance peuvent être utilisés. Les plus populaires sont des supports qui possèdent des nanopores verticaux comme ceux réalisés par anodisation de l'aluminium. Les nanotubes croissent à l'intérieur des pores de manière contrôlée. La Figure 10.b montre ce qui est possible d'obtenir avec cette technique. Les plus petits nanotubes (0.4 nm de diamètre) ont été fabriqués à l'aide d'un moule de zéolite [16].

Une autre stratégie pour obtenir des nanotubes alignés verticalement ou horizontalement consiste à utiliser un champ électrique. Lors de leur croissance les nanotubes

s'alignent le long du champ électrique (Fig. 10.c). Cette technique est particulièrement utile pour produire des nanofils intégrés dans des dispositifs électroniques. Des connexions électriques ainsi que divers dispositifs ont ainsi pu être synthétisés.



**Figure 10 - Méthodes d'alignement des nanotubes lors de leur croissance. (a) Une forêt dense de nanotubes croît de manière quasi alignée. (b) Des nanotubes parfaitement droits, régulièrement espacés, de même diamètre et de même longueur croissent dans les nanopores d'un moule en aluminium. (c) Un champ électrique de  $0.5\text{V}/\mu\text{m}$  est utilisé pour guider la croissance de SWNTs horizontalement entre deux électrodes. (d) Nanotubes droits et verticalement alignés synthétisés par PECVD.**

#### La CVD assistée par plasma

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) est une technique plus récente qui permet de produire des nanotubes alignés verticalement à relativement basse température. Dans un four contenant l'échantillon en son centre, un plasma froid est généré par excitation radiofréquence, ou micro-ondes, ou par décharge de courant continu. Les systèmes plasmas sont couramment employés en technologie des semi-conducteurs pour la gravure ou le dépôt de couche mince. Les dépôts plasma sont très stables et permettent des conditions de croissance facilement contrôlables et reproductibles (Fig. 10.d).

Un des problèmes technologiques rencontré pour la fabrication d'écrans d'affichage est la haute température nécessaire à la croissance des nanotubes ( $>700^\circ\text{C}$ ) qui excède le *strain point* des meilleurs verres utilisés pour l'affichage ( $666^\circ\text{C}$ ). La PECVD constitue une solution car l'énergie apportée par le plasma et le chauffage radiofréquence se substituent à l'énergie thermique pour permettre la formation de nanotubes à plus basse température. Certains travaux récents viennent de démontrer la faisabilité d'une croissance à

température ambiante [17].

#### HipCo

La technologie HipCo a été développée à Rice University (Houston) dans l'équipe de Rick Smalley. Elle a conduit au lancement de la société Carbon Nanotechnologies, Inc. (CNI) qui est maintenant le leader mondiale dans la production de SWNTs. C'est une méthode CVD particulière qui utilise deux flux de gaz, un mélange froid  $\text{Fe}(\text{CO})_5/\text{CO}$  et un flux préchauffé de CO. Le processus est continu et produit des SWNTs de bonne qualité avec de bons rendements.

### III Production industrielle aux USA

La capacité de production de nanotubes a fortement augmenté ces dernières années. En 2004, 65 tonnes ont été produites mondialement, correspondant à une valeur de 144 millions d'euros. En 2010 ce chiffre dépassera 3 milliards soit une progression annuelle de 65% [18].

Les Etats-Unis sont pour l'instant les leaders mais seront probablement dépassés par la Chine et la Corée d'ici quelques années. L'Europe et le Japon représentent deux autres importants producteurs.

Le prix des nanotubes devrait chuter d'un facteur 10-100 d'ici 5 ans, ce qui rendra les nanotubes compétitifs pour de nombreuses applications. Les producteurs sont encore peu nombreux aujourd'hui. On en dénombre une dizaine aux USA (TABLEAU 1).

Les capacités de production des usines sont de l'ordre de quelques kg par jour. CNI, qui domine le marché grâce au procédé HipCo, produit près de 40kg de SWNTs par jour avec sa dernière unité de production. Les prix sont très variables en fonction de la pureté, de la qualité cristalline et du type de produit. Un gramme de SWNTs purifiés ( $>90\%$ ) se vend entre 150\$ [19] et 2000\$ [20]. Les MWNTs sont en général moins cher.

### IV Principaux groupes de recherche sur la synthèse des nanotubes aux Etats-Unis

En l'espace de 15 ans, les nanotubes de carbone ont mobilisé l'attention de centaines de chercheurs et fait l'objet de milliers de publications. La synthèse des nanotubes est l'étape clé au développement de leurs applications. Malgré d'immenses progrès réalisés dans les techniques de production, les recherches continuent pour améliorer les rendements, la pureté, la cristallinité, la spécificité, réduire le coût et passer à une production de masse.

Le TABLEAU 2 référence les principaux groupes de recherche impliqués dans la production de nanotubes. Cette liste ne prétend pas à l'exhaustivité. Les groupes s'intéressant aux nanotubes sont très nombreux et il est parfois difficile de distinguer les équipes qui se focalisent sur l'étude de la synthèse plutôt que sur celle des propriétés ou des applications.

TABLEAU 1

Sociétés impliquées dans la production de nanotubes aux Etats-Unis			
<u>Société</u>	<u>Siège social</u>	<u>Produits</u>	<u>Méthode(s) de production</u>
<a href="#">Ahwahnee</a>	San Jose, Californie	SWNTs & MWNTs	
<a href="#">Apex Nanomaterials</a>	San Diego, Californie	SWNTs	CVD
<a href="#">Atomate</a>	Santa Barbara, Californie	Catalyseurs, substrats et appareillages CVD pour CNTs	
<a href="#">BuckyUSA</a>	Houston, Texas	Producteur de fullerènes et CNTs.	
<a href="#">Carbolex</a>	Lexington, Kentucky	SWNTs	Arc
<a href="#">Carbon Design (CDI)</a>	Dallas, Texas	Fibres et composites avec des nanotubes	
<a href="#">Carbon Nanotechnologies (CNI)</a>	Houston, Texas	SWNTs	HiPCO
<a href="#">Carbon Solutions</a>	Riverside, Californie	SWNTs	Arc
<a href="#">Catalytic Materials LLC</a>	Holliston, Massachusetts	MWNTs	CVD
<a href="#">Cheap Tubes</a>	Brattleboro, Vermont	Revendeur SWNTs, MWNTs	
<a href="#">Helix Material Solutions</a>	Richardson, Texas	SWNTs & MWNTs	CVD et arc
<a href="#">Hyperion</a>	Cambridge, Massachusetts	MWNTs, commercialisés sous le nom de Fibril	CVD
<a href="#">Materials and Electrochemical Research (MER)</a>	Tucson, Arizona	SWNTs & MWNTs	CVD et arc
<a href="#">MicroTechNano</a>	Indianapolis, Indiana	SWNTs, DWNTs and MWNTs	
<a href="#">Molecular Nanosystem</a>	Palo Alto, California	R&D pour les applications des CNTs	CVD
<a href="#">NanoCraft</a>	Renton, Washington	SWNTs & MWNTs	Arc
<a href="#">Nanocs</a>	New York, NY	SWNTs & MWNTs	Arc
<a href="#">NanoLab</a>	Newton, Massachusetts	MWNTs	CVD
<a href="#">Nanostructured &amp; Amorphous Materials</a>	Los Alamos, New Mexico	SWNTs & MWNTs	CVD
<a href="#">Reade Advanced Materials</a>	Providence, Rhode Island	Nanoparticules, poudres et CNTs	
<a href="#">SES Research</a>	Houston, Texas	SWNTs & MWNTs	Arc
<a href="#">Sigma-Aldrich</a>	St Louis, Missouri	SWNTs & MWNTs	Arc et CVD
<a href="#">Southwest NanoTechnologies</a>	Oklahoma City, OK	SWNTs	CVD (CoMoCAT)
<a href="#">Tailored Materials Corporation</a>	Tucson, Arizona	Double-wall Carbon Nanotubes	
<a href="#">Xintek</a>	Research Triangle Park, North Carolina	MWNTs	
<a href="#">Zyvex</a>	Richardson, Texas	Fonctionnalisation de nanotubes et nano-manipulateurs	

TABLEAU 2

Principaux groupes de recherche impliqués dans la production de nanotubes aux Etats-Unis		
Université/ laboratoire	Directeur de laboratoire	Thème(s) de recherche(s)
Rice University	James Tour	Rick Smalley, décédé le 28 novembre 2005, prix Nobel de Chimie en 1996 pour la découverte des fullerènes était jusqu'à récemment à la tête du Carbon Nanotechnologies Lab, l'un des plus actifs aux USA dans le domaine des nanotubes. Plusieurs dizaines de brevets sur les procédés de synthèse des nanotubes ont été déposés par l'équipe de R. Smalley qui a lui-même fondé CNI, l'entreprise leader pour la production de SWNTs. <a href="http://smalley.rice.edu/index.cfm">http://smalley.rice.edu/index.cfm</a>
Stanford University	H. J. Dai	L'équipe de Dai a beaucoup apporté aux connaissances sur la synthèse CVD des nanotubes. Les travaux actuels sont centrés sur la synthèse ordonnée de nanotubes sur substrat pour des applications électroniques. <a href="http://www.stanford.edu/dept/chemistry/faculty/dai/group/">http://www.stanford.edu/dept/chemistry/faculty/dai/group/</a>
Duke University	J. Liu	Le groupe de Liu est réputé pour ces travaux sur la synthèse de SWNTs. Ses travaux ont apporté des avancées importantes sur la synthèse CVD. <a href="http://www.chem.duke.edu/~jliu/labgroup/">http://www.chem.duke.edu/~jliu/labgroup/</a>
Rensselaer Polytechnic Institute	P. M. Ajayan	Prof. Ajayan, à la tête du Carbon Nanomaterial Research Group, est impliqué dans un nombre impressionnant de travaux sur les nanotubes. Son expertise va de la synthèse jusqu'aux diverses applications envisagées pour les nanotubes. <a href="http://www.rpi.edu/locker/38/001238/INDEX.HTM">http://www.rpi.edu/locker/38/001238/INDEX.HTM</a>
University of Texas at Dallas	Ray H. Baughman	R. Baughman est connu pour ces travaux sur les fibres de nanotubes. Au sein du Nanotech Institute de UT Dallas, il a développé une méthode de tressage à partir d'une « forêt » de nanotubes pour former des fibres. Son équipe a fabriqué des canevas par un entrelacement de ces fibres. Ces « tissus » de nanotubes possèdent des propriétés électriques et mécaniques intéressantes. <a href="http://www.nanotech.utdallas.edu/personnel/staff/baughman.html">http://www.nanotech.utdallas.edu/personnel/staff/baughman.html</a>
Berkeley	Zettl	Zettl et son équipe utilisent l'ablation laser et l'arc électrique pour produire des nanotubes de haute qualité et en étudier leurs structure et propriétés. <a href="http://www.physics.berkeley.edu/research/zettl/projects/synth.html">http://www.physics.berkeley.edu/research/zettl/projects/synth.html</a>
NASA, JSC Nano Materials Project		La NASA a misé gros sur les nanotubes en espérant en faire les matériaux de demain pour les véhicules spatiaux. Le centre NASA de Houston travaille en collaboration avec Rice University sur la production de nanotubes. <a href="http://mmpdpublic.jsc.nasa.gov/jscnano/">http://mmpdpublic.jsc.nasa.gov/jscnano/</a>
NASA, Ames' Center for Nanotechnology		Un deuxième centre de la NASA travaille sur les nanotubes. Là encore les recherches sur les nanotubes couvrent un large spectre d'applications. En ce qui concerne la production, deux axes de recherche sont poursuivis : la production de masse pour matériaux structurels et la production contrôlée pour l'intégration dans des systèmes. <a href="http://www.ipt.arc.nasa.gov/nano_rd_focus.html">http://www.ipt.arc.nasa.gov/nano_rd_focus.html</a>
IBM	Phaedon Avouris	Phaedon Avouris dirige la section nanoscience chez IBM. Il a publié de nombreux travaux importants sur la synthèse de nanotubes. <a href="http://www.research.ibm.com/nanoscience/">http://www.research.ibm.com/nanoscience/</a>
University of Oklahoma	Daniel Resasco	Inventeur de la méthode de synthèse de nanotubes CoMoCAT® qui a donné naissance à la société SouthWest Nanotechnologies. <a href="http://www.ou.edu/engineering/nanotube/">http://www.ou.edu/engineering/nanotube/</a>
Oak Ridge National Laboratory	Alex Puzos	Oak Ridge fait partie des 5 centres nano du DOE (Departement Of Energy). La synthèse de nanotubes par PECVD fait partie des thèmes de recherches poursuivis. <a href="http://www.ornl.gov/sci/ment/research/carbon.htm">http://www.ornl.gov/sci/ment/research/carbon.htm</a> <a href="http://www.ornl.gov/~odg/compositesmain.html">http://www.ornl.gov/~odg/compositesmain.html</a>
Penn State University	C. Eklund	Synthèse de nanotubes par CVD, arc électrique et ablation laser. Eklund est le fondateur de la société Carbolex, producteur de SWNTs et spin-off de University of Kentucky, <a href="http://www.personal.psu.edu/faculty/p/c/pce3/group_members/peter.htm">http://www.personal.psu.edu/faculty/p/c/pce3/group_members/peter.htm</a>
Boston College	Ren	Les recherches du Prof. Ren portent sur la synthèse de nanotubes alignés par PECVD et la production de masse. <a href="http://ph99.bc.edu/faculty/Ren.html">http://ph99.bc.edu/faculty/Ren.html</a>
Northwestern University	RPH Chang	Méthodes CVD pour la fabrication d'écran. <a href="http://www.matsci.northwestern.edu/faculty/rphc.html">http://www.matsci.northwestern.edu/faculty/rphc.html</a>
Georgia Tech	Z.L. Wang	Le groupe de Wang poursuit de nombreuses recherches en nanotechnologie. La croissance CVD en fait partie. <a href="http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/">http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/</a>

## V Conclusion

Certains critiques affirment que les nanotubes de carbone ne se sont pas montrés à la hauteur des espoirs qu'ils ont suscités. Il est vrai que les défis technologiques sont nombreux et des applications à grande échelle mettront du temps à voir le jour. Les plus optimistes tablent sur l'horizon 2010 pour un réel décollage de la production de nanotubes. Il est cependant indéniable qu'une nouvelle industrie est née et que des sommes importantes ont été investies dans la recherche fondamentale et le développement. Les principales barrières technologiques ont été franchies et les premières applications font leur apparition. La production des nanotubes est dès lors la clé technologique du développement de la filière. On assiste aujourd'hui à une compétition internationale pour l'acquisition de propriétés intellectuelles sur les méthodes de production. Les Etats-Unis sont actuellement au premier plan mais l'Europe et l'Asie se montrent également très actives. Un tel dynamisme conduira à une baisse rapide des prix et l'amélioration permanente des techniques permettra de démocratiser les nanotubes pour les matériaux et les dispositifs de demain.

Rémi Delville,  
Attaché Scientifique Adjoint à Houston  
[science@consulfrance-houston.org](mailto:science@consulfrance-houston.org)

## Bibliographie

- [1] <http://www.onera.fr/conferences/nanotubes/trans34.htm>
- [2] <http://www.xintek.com/products/devices/xraytube.html>
- [3] <http://www.nano-proprietary.com/index.htm?ani.htm>
- [4] [http://www.nanoscience.com/products/carbon\\_nanotube\\_probes.html](http://www.nanoscience.com/products/carbon_nanotube_probes.html)
- [5] <http://cmliris.harvard.edu/research/bionano/index.php>
- [6] <http://www.nantero.com/index.html>
- [7] <http://www.nanodynamics.com>
- [8] [http://www.eastonbike.com/PRODUCTS\\_TECHNOLOGY/tech\\_cnt.html](http://www.eastonbike.com/PRODUCTS_TECHNOLOGY/tech_cnt.html)
- [9] <http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3123&context=postprints>
- [10] [http://www.nrel.gov/basic\\_sciences/carbon\\_based\\_hydrogen\\_center.cfm](http://www.nrel.gov/basic_sciences/carbon_based_hydrogen_center.cfm)
- [11] [http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/vi\\_c\\_1\\_heben.pdf](http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/vi_c_1_heben.pdf)
- [12] <http://www.nasa.gov/centers/johnson/news/releases/J05-018.html>
- [13] <http://cohesion.rice.edu/CentersAndInst/CNST/emplibrary/Schmidt%2011-15-05.pdf>
- [14] *Catalytic Synthesis of Carbon nanotubes and Nanofibers*, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Kenneth B. K. Teo, Charanjeet Singh, Manish Chhowalla et William I. Milne, University of Cambridge.
- [15] *Synthetic Methods and Growth Mechanisms*, A. Loiseau, X. Blasé, J.-Ch. Charlier, P. Gadelle, C. Journet, Ch. Laurent et A. Peigney.
- [16] N. Wang, Z.K. Tang, G.D. Li, and J.S. Chen, Nature 408,50 (2000)
- [17] <http://www.cevp.co.uk/nanogrowth/>
- [18] <http://www.cientifica.com/www/details.php?id=24>
- [19] <http://www.cheaptubesinc.com/pricelist.ht>
- [20] [http://cnanotech.com/pages/store/6-0\\_online\\_store.html#Research\\_Grades](http://cnanotech.com/pages/store/6-0_online_store.html#Research_Grades)

## La Recherche Américaine : Vers un Modèle Ouvert Basé sur la Collaboration

Le modèle qui a conduit autrefois les grands laboratoires industriels américains du 20<sup>ième</sup> siècle (Bell, HP, IBM, Xerox PARC, etc...) à de formidables découvertes scientifiques n'est plus adapté aujourd'hui. Pour maintenir la position de leader mondial des Etats-Unis dans le domaine de la recherche et des nouvelles technologies, de nouvelles organisations de la recherche se mettent progressivement en place. En pratique cela se traduit notamment par la création d'instituts de recherche co-financés par les Etats, les universités et le secteur privé. La combinaison de compétences humaines, académiques et industrielles, réunies autour d'objectifs communs est reconnue comme essentielle pour transférer l'innovation du laboratoire vers des applications concrètes de la vie de tous les jours, créer de nouvelles entreprises et ouvrir de nouveaux marchés. Le rôle des universités sur la croissance économique et l'amélioration de la société est incontestable [1]. Le monde académique et le monde industriel ont besoin de travailler ensemble sur la base d'un nouveau modèle qui réponde aux problèmes de droit de propriété intellectuelle et renforce la collaboration au bénéfice de la recherche. La transition vers cette nouvelle vision de la recherche et de l'innovation est en cours mais de nombreuses organisations n'ont pas encore saisi les enjeux de ce changement.

Dans son ouvrage, "Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting From Technology", Henry Chesbrough [2], explique pourquoi et comment les entreprises ont besoin de faire évoluer leur processus d'innovation d'un modèle traditionnel vers un modèle plus "ouvert". Parmi les préconisations qu'il suggère, on peut notamment citer : de fortes collaborations entre l'industrie et la recherche académique, une mise à profit de la richesse des connaissances externes à l'entreprise (universités, réseaux d'experts, consultants, start-ups, etc) et une approche moins propriétaire des résultats de la recherche à l'image du modèle "open source" en informatique.

En s'appuyant sur les concepts développés par Henry Chesbrough, nous allons d'abord présenter le processus classique d'innovation des grands laboratoires industriels, expliquer pourquoi il n'est plus adapté aujourd'hui et enfin détailler les grands principes de cette nouvelle logique. Les stratégies innovantes récemment mises en place par Intel, Procter & Gambel et Millennium Pharmaceuticals nous servent d'exemples pour illustrer les mérites de cette approche.

La dernière partie de ce dossier est consacrée à un centre de recherche universitaire, le Berkeley Wireless Research Center (BWRC), pionnier en matière de collaboration

et de gestion de la propriété intellectuelle. Son organisation a été pensée afin d'éliminer les conflits d'intérêt économique et la compétition entre les partenaires industriels qui freinent l'avancée de la recherche. Suite à la visite du laboratoire et des discussions avec les responsables, il est clairement apparu que le modèle répondait particulièrement bien à un certain nombre de problèmes comme la gestion de multiples partenariats industriels, la construction d'un agenda de recherche commun, ou encore la gestion de projets interdisciplinaires. Lors de notre entretien avec le responsable industriel de la collaboration entre STMicroelectronics et le BWRC, celui-ci s'est montré très satisfait de cette collaboration, il en vante les bénéfices.

### I. Une nouvelle vision de la R&D

Pendant une grosse partie du 20<sup>ième</sup> siècle, les grandes entreprises américaines ont considéré que pour bénéficier d'un avantage compétitif fort et s'assurer des profits élevés, il fallait créer de grands centres de recherche et lancer en interne de vastes programmes de R&D. Avec cette organisation, les découvertes scientifiques résultant de la recherche sont exploitées pour porter sur le marché de nouveaux produits et services. Une partie des profits réalisés grâce à la vente de ces nouveaux produits est réinvestie dans la R&D. Le cercle vertueux présenté ci-dessous (Fig. 1) correspond à un système fermé où l'entreprise crée en interne les connaissances sources de son bénéfice futur.

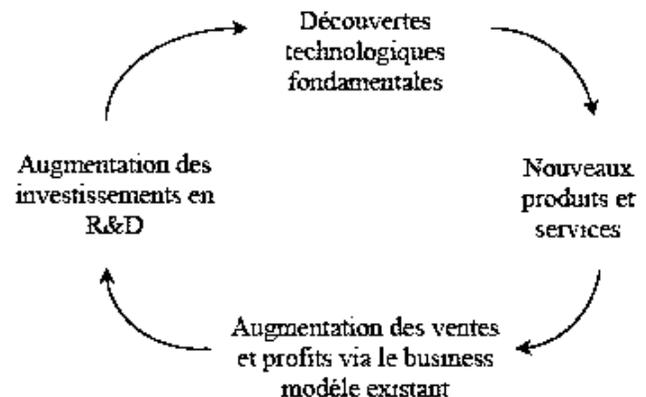


Figure 1 - Processus d'innovation des grands laboratoires industriels du 20<sup>ième</sup> siècle.

Cette vision a donné naissance à de grands laboratoires de recherche industrielle devenus célèbres grâce aux avancées scientifiques et technologiques majeures auxquelles ils ont contribué tout au long du siècle. Ils ont joué un rôle important dans les avancées scientifiques fondamentales et ont souvent vu certains de leurs chercheurs récompensés par des Prix Nobel ou d'autres distinctions.

## Quelques innovations célèbres issues de grands centres de R&D industrielle

Bell Labs – 1925	Télécommunication transatlantique (1927)
	Transistor (1947)
	Cellule solaire (1950)
	Internet & système d'exploitation UNIX (1969)
GE labs – 1900	L'ampoule incandescente (1909)
	Tube à rayon X (1913)
	Source laser (1962)
	CT scanner ou tomodensitomètre (1976)
IBM Labs – 1945	Disque dur (1956)
	DRAM (1968)
	Architecture token-ring (1985)
	Supraconduction à haute température critique (1986)
HP Labs – 1966	Diode électroluminescente (1968)
	Calculatrice scientifique de poche (1972)
	Impression jet d'encre thermique (1984)
	Porte logique moléculaire – en collaboration avec l'université de Los Angeles (1999)
Xerox PARC – 1970	Ethernet - Architecture client/serveur (1973)
	Impression laser (1973)
	Graphical User Interface (GUI) comprenant icons et pop-up menus (1975)
	Technologie linguistique pour correcteur orthographique (1979)

Ces grands laboratoires industriels, qui ont connu leur apogée vers la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, s'impliquent désormais moins dans la recherche fondamentale (projets à plus de dix ans). Ils sont soumis à une concurrence très forte et fonctionnent dans une logique de retour sur investissement rapide. Les effectifs des laboratoires ont ainsi été fortement réduits. La tendance est désormais au partenariat fort avec le monde académique. Les industriels affirment qu'ils n'hésitent pas à collaborer entre eux ou à partager une collaboration avec les universités sans trop de souci de confidentialité pour les programmes à long terme. C'est le cas par exemple d'IBM qui travaille avec l'université Stanford, de Hewlett-Packard avec les Sandia Labs (laboratoire national sur les technologies militaires) ou encore de Texas Instruments avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

De nombreux exemples montrent que ce modèle est en pleine évolution. Les centres de R&D des grandes entreprises ne constituent plus une barrière face à l'entrée de nouveaux acteurs. Cisco, Intel, Microsoft ou Sun sont de jeunes entreprises qui ont réussi à s'imposer sur leur marché en ne conduisant que très peu ou aucune recherche fondamentale. Ces compagnies sont pourtant très innovantes car elles savent exploiter les résultats scientifiques provenant d'acteurs externes (universités, start-ups, fournisseurs, etc...).

## I. 1 Les facteurs de changements

Avant de comprendre pourquoi le modèle des grands laboratoires industriels ne fonctionne plus, voici selon Henry Chesbrough les règles tacites qui le caractérisent :

- Notre politique de recrutement doit être telle que les gens les plus compétents de notre secteur travaillent pour nous.
- Pour porter de nouveaux produits et services sur le marché, nous devons découvrir et développer les choses par nous-même.
- Si nous sommes à l'origine des découvertes nous pourrions les mettre sur le marché en premier.
- L'entreprise qui innove en premier sera généralement celle qui gagnera.
- Si nous sommes les leaders en terme d'investissements en R&D, nous générerons les meilleures et la plupart des idées. En conséquence, nous deviendrons les leaders du marché.
- Nous devons gérer notre propriété intellectuelle de sorte que les concurrents ne puissent pas profiter de nos idées.

Ce modèle qu'Henry Chesbrough appelle « Closed Innovation » repose entièrement sur une vision interne de la connaissance. C'est comme si tout se passait à l'intérieur des quatre murs de l'entreprise ou du laboratoire et qu'il fallait se protéger de l'environnement extérieur. Même si ces règles restent encore applicables dans certains secteurs spécifiques comme le nucléaire ou l'aéronautique, elles ne correspondent plus à la réalité de nombreuses industries: automobile, biotechnologie, pharmacie, logiciel, télécommunication, finance, assurance, etc. De multiples facteurs permettent d'expliquer la fin des monopoles de la connaissance:

### I.1.1 L'augmentation de la mobilité des travailleurs qualifiés

Dans la Silicon Valley par exemple, le taux mensuel de changement d'employeur est de 2,41% [3]. Autrement dit, sur une population de 1000 travailleurs, 24 auront changé d'employeur entre le début et la fin du mois. Ces mouvements induisent une déconcentration de la connaissance et des compétences.

### I.1.2 Disponibilité internationale des compétences scientifiques

Selon une enquête réalisée en 1998 par la National Science Foundation (NSF), plus de 50% des post-doctorants du Massachusetts Institute of Technologies (MIT) et de l'université Stanford ne sont pas de nationalité américaine [4]. Par ailleurs, plus de 30% des professionnels de l'informatique dans la Silicon Valley sont nés en dehors des Etats-Unis. Ce flux entrant de talents étrangers ainsi que la forte mobilité des travailleurs qualifiés a été très profitable à l'économie américaine. Cependant les possibilités de retour grandissantes de ces talents étrangers dans leur pays d'origine posent de sérieux problèmes pour les entreprises et la recherche américaine.

### I.1.3 Forte croissance du capital risque et des start-ups

Selon une étude réalisée par la National Venture Capital Association (NVCA), l'investissement des sociétés de capital risque aux Etats-Unis est passé de 2 milliards de dollars en 1991 à 12 milliards en 1996 et 21 milliards en 2004 [5]. Les perspectives offertes par les nombreuses start-ups financées par le capital risque ont incité un grand nombre d'individus à quitter leur laboratoire ou leur grande entreprise.

*Le Capital Risque ou Venture Capital (VC) est une activité consistant à financer en capitaux propres des entreprises nouvellement créées et à fort potentiel de croissance. Les investisseurs sont souvent constitués sous forme d'entreprises qui peuvent prendre diverses formes juridiques. La Silicon Valley représente environ 1/3 des activités du Capital Risque aux USA. Elle reste donc toujours le centre de l'activité du Capital Risque. Pour plus d'information, consulter le rapport de F. Verdier et C. Lerouge, "Le Capital Risque dans la Silicon Valley", <[http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05\\_102.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_102.htm)>*

### I.1.4 Nouvelles alternatives pour les technologies non utilisées

Dues aux tensions internes qui existent généralement dans les grandes entreprises entre les groupes de recherche et les groupes de développement qui ont des objectifs à plus court terme, certaines nouvelles technologies n'étaient pas exploitées. De la même manière lorsqu'elles ne correspondaient pas au marché visé par l'entreprise, elles finissaient par disparaître sans être valorisées. Grâce à une forte présence du capital risque, aux possibilités de création de start-up ou de ventes de licences, ces technologies «orphelines» peuvent être portées vers de nouveaux marchés.

### I.1.5 Diffusion plus large de la connaissance

D'après les chiffres du U.S Patent and Trademark Office (USPTO), entre 1981 et 1999, la part de la R&D industrielle réalisée par les entreprises de moins de 1000 employés est passée de 4.4% à 22.5%. Sur la même période, celle des grandes entreprises de plus de 25 000 employés est passée de 70.7% à 41.3%. On observe aussi une internationalisation forte de la recherche: en 1999, 45% des brevets américains ont été déposés par des particuliers ou des compagnies étrangères (20% par des entreprises japonaises).

## I. 2 Un processus d'innovation ouvert

Le concept d'intégration verticale de la R&D qui a prévalu durant une grande partie du 20<sup>ème</sup> siècle est illustré (Fig. 2) ci-dessous.

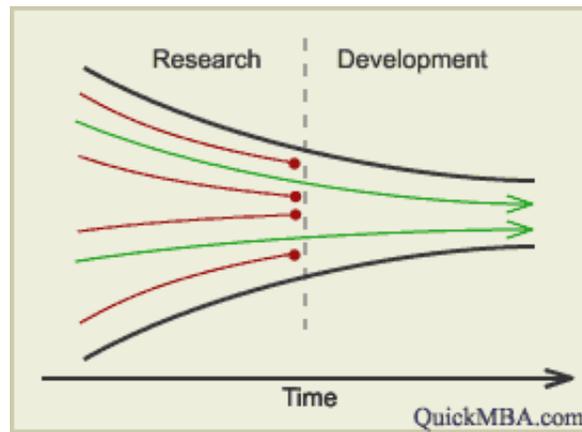


Figure 2 - Concept d'innovation fermée - Source QuickMBA.com

Les lignes rouges représentent les projets de recherche qui ont été menés par l'entreprise mais qui n'ont pas abouti à du développement. Ces projets se retrouvent souvent sans suite faute d'opportunité de marché. Il existe de nombreux exemples de compagnies qui ont développé des technologies de ruptures mais qui n'ont pas réussi à en tirer profit. Par exemple, le Xerox Palo Alto Research Center (PARC) a été à l'origine de nombreuses technologies qui n'ont pas su être valorisées et qui ont permis à des personnes extérieures de créer des start-ups (Adobe, 3Com, etc) dont la capitalisation boursière est aujourd'hui plus importante que celle de Xerox elle-même.

Plutôt que de considérer le processus de R&D comme un système tenu étroitement à l'intérieur de l'entreprise, le concept « Open Innovation » est un système ouvert (Fig. 3) où les résultats de la recherche peuvent traverser les frontières de l'entreprise.

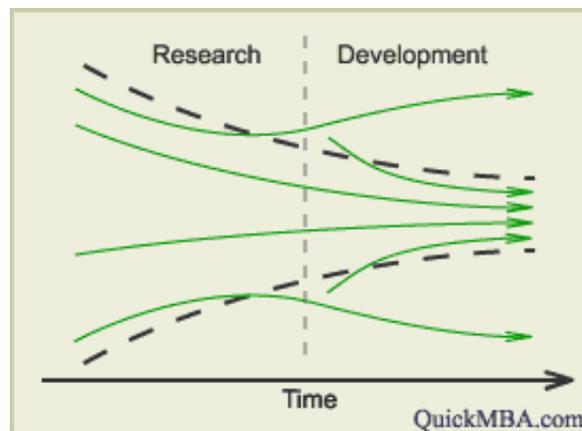


Figure 3 - Concept d'innovation ouverte - Source QuickMBA.com

La firme développe aussi les technologies qui n'ont pas été issues de sa propre recherche et à l'inverse les résultats de recherche qu'elle ne peut pas développer sont valorisés à travers la vente de licences, la recherche de partenaires ou la création de start-ups. Au final, comparée au modèle classique illustré par la figure 2, la logique du modèle « Open Innovation » conduit à porter un plus grand nombre

d'innovations sur le marché.

Par ailleurs, dans cette logique le capital risque n'est pas considéré comme une menace mais plutôt comme un catalyseur du processus d'innovation. Les bénéfices qu'une grande compagnie peut en tirer sont :

- Une nouvelle voie d'accès au marché pour les technologies qui ne seraient autrement pas exploitées.
- Une incitation à sortir les technologies plus rapidement du laboratoire.
- Les start-ups, qui expérimentent de nouveaux marchés, représentent d'excellents cas d'études pour évaluer de nouvelles opportunités de marché. Ces start-ups vendent des produits à des clients réels et en ce sens leur expérience est plus pertinente qu'une hypothétique étude de marché.

Afin d'aider les entreprises à mettre en place un modèle de type « Open Innovation », voici les règles que propose Henry Chesbrough :

- Il faut revoir le rôle de la R&D et ne pas le restreindre uniquement à la génération de connaissances mais inclure la diffusion de celles-ci et l'intégration de connaissances externes.
- Nous ne devons pas être obligatoirement propriétaires de la recherche pour en tirer profit.
- Nous devons collaborer pour faire avancer notre technologie. La recherche peut nous aider à définir comment collaborer.
- Les gens compétents ne peuvent pas tous travailler chez nous. En conséquence nous devons aussi travailler avec les personnes compétentes qui ne sont pas de l'entreprise.
- La R&D réalisée à l'extérieur de l'entreprise peut aider à créer de la valeur mais la R&D interne est utile pour capter une partie de cette valeur.
- Il vaut mieux construire un bon business modèle qu'être le premier sur le marché.
- Si nous faisons une très bonne utilisation des idées internes et externes, nous gagnerons.
- Il ne suffit pas de valoriser sa propre propriété intellectuelle mais il est aussi intéressant d'avoir accès à celle des autres pour faire avancer notre business.

La transition vers ce modèle a démarré dans les années 1990 et se poursuit encore aujourd'hui. Nous avons choisi ci-dessous quelques exemples d'entreprises dont la stratégie s'inscrit dans la logique du modèle « Open Innovation » :

### 1.2.1 Intel installe des laboratoires «ouverts» au coeur des meilleures universités

Intel a récemment mis en place un réseau de laboratoires (Fig. 4) situés sur les campus des meilleures universités mondiales [6].

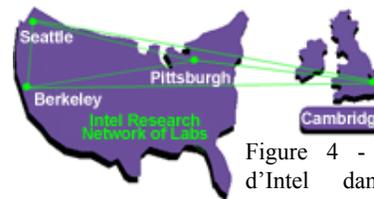


Figure 4 - Réseau de laboratoires d'Intel dans les universités [6]

Ces centres de recherche co-dirigés par des chercheurs universitaires fonctionnent sur un modèle basé sur la collaboration et des droits de propriété intellectuelle non-exclusifs. La plupart des résultats obtenus est largement diffusée et partagée avec l'ensemble de la communauté scientifique. Les projets de recherche menés au sein de ces laboratoires sont bien entendu de nature exploratoire et assez éloignés du coeur de métier de l'entreprise. Le laboratoire situé à Berkeley travaille par exemple sur la problématique des nouvelles technologies pour les pays en voie de développement et conduit des projets dans plusieurs pays : Bangladesh, Cambodge, Inde, Sri Lanka, etc. En répondant à des problèmes comme l'accès aux réseaux de télécommunications ou le fonctionnement des ordinateurs dans les régions isolées, Intel participe au développement de ces pays et étend à terme le spectre des utilisateurs potentiels de sa technologie.

Le financement d'une partie de la recherche universitaire permet à Intel de bénéficier des compétences d'excellents chercheurs et étudiants pour étudier et définir les technologies du futur à travers des projets à long terme. Par ailleurs, les universités représentent un formidable vivier de recrutement. Intel participe à la définition des nouvelles formations scientifiques et se crée ainsi un accès privilégié vers de jeunes talents susceptibles de répondre aux futurs besoins humains de l'entreprise.

Le rôle des laboratoires de recherche industrielle a évolué, ils continuent de créer de nouvelles connaissances en interne mais ont aussi comme premier objectif de développer des collaborations avec l'ensemble de la communauté scientifique afin d'identifier, comprendre et intégrer de la connaissance externe. La valeur ajoutée provient désormais de l'association de connaissances internes et externes pour former des systèmes plus complexes.

### 1.2.2 Comment Procter & Gamble profite des idées externes ?

Procter et Gamble (P&G) est un géant des produits de grande consommation avec un effectif mondial de 110 000 personnes réparties dans 140 pays et un budget R&D annuel de 1.7 milliards de dollars. Afin de répondre à divers problèmes d'ordre scientifique, P&G sollicite les compétences d'un réseau mondial de scientifiques à travers un service Internet proposé par la jeune société InnoCentive Inc. Le principe de ce service est illustré sur le schéma (Fig. 5) qui suit.



Figure 5 - Principe du service développé par l'entreprise InnoCentive.

Les défis scientifiques soumis par les entreprises (ex: Boeing, P&G, Dupont, etc) sont consultables par un réseau mondial de 80 000 chercheurs. Des royalties sont attribuées aux auteurs des solutions retenues par les entreprises. Ainsi, sur les 24 demandes que P&G a soumises au réseau d'InnoCentive, plus d'un tiers ont obtenu des solutions pour lesquelles leurs auteurs ont perçu 5000 dollars chacun. En employant InnoCentive et d'autres moyens permettant d'atteindre des talents indépendants, P&G a fait passer en trois ans le nombre de nouveaux produits issus d'idées extérieures de 20 à 35% [7]. En conséquence, les ventes par personnel de R&D sont en progression d'environ 40%.

### 1.2.3 Millennium Pharmaceuticals : une gestion «gagnant-gagnant» de la propriété intellectuelle

Millennium Pharmaceuticals est une jeune entreprise de biotechnologie qui pour améliorer ses perspectives de développement a construit son modèle économique autour d'une gestion non-exclusive de la propriété intellectuelle [8]. Millennium fournit de l'information et des analyses biologiques pour les grands groupes pharmaceutiques qui développent de nouveaux médicaments.

Le modèle économique généralement utilisé pour ce type d'entreprise est celui des contrats de service. L'entreprise effectue de la recherche pour le compte d'un grand groupe pharmaceutique qui est propriétaire des résultats obtenus. Les inconvénients de ce modèle sont d'une part que la diffusion de la propriété intellectuelle est restreinte au marché du client qui paye le service et que la croissance d'une telle entreprise reste assez limitée en raison notamment de l'absence d'économies d'échelles. Le modèle de Millennium consiste à créer une situation de "gagnant-gagnant" où la valeur potentielle de la propriété intellectuelle est distribuée de la façon suivante :

- Millennium détient la propriété intellectuelle et peut générer des revenus complémentaires en s'autorisant la vente de licences aux entreprises qui ne travaillent pas sur le même marché que le client principal, le groupe pharmaceutique.

- Les grands groupes pharmaceutiques obtiennent quant à eux la propriété intellectuelle qu'ils désirent pour un coût inférieur à celui qui aurait été appliqué s'ils avaient été entièrement propriétaires.

Dans ce modèle, la valeur potentielle de la propriété intellectuelle est mieux exploitée puisqu'elle n'est pas restreinte à une seule entreprise.

### Quelques exemples de start-ups "Open Innovation"

Réseau de scientifiques : <http://www.innocentive.com>

Gestion du processus d'innovation : <http://www.ugs.com/index.shtml>, <http://www.ninesigma.net/>

Recherche biomédicale : <http://www.mlmm.com/>

Experts développement produit : <http://www.bit7.com/>

<http://www.netideasinc.com/index.jsp>

## II. Le Berkeley Wireless Research Center (BWRC)

### II.1 Présentation

En s'appuyant sur les enseignements tirés d'un projet interdisciplinaire (InfoPad) conduit sur 7 ans et impliquant plusieurs partenaires industriels, un groupe de chercheurs créent en 1998 le Berkeley Wireless Research Center [9]. Cette structure est aujourd'hui pionnière en matière de collaboration université / industrie. Le modèle mis en place a pour vocation de faire converger les intérêts de tous les acteurs (étudiants, professeurs et industriels) afin que les collaborations soient les plus profitables et que les projets menés répondent à des objectifs ambitieux.

#### II.1.1 Un espace conçu pour faciliter les échanges

Le BWRC rassemble 60 étudiants, 11 chercheurs universitaires et 17 représentants industriels dans un espace moderne (1000 mètres carrés) conçu de manière à offrir une grande flexibilité et à favoriser la collaboration informelle.



Figure 6 - Images des locaux du BWRC

La pièce centrale circulaire est un large "forum" de discussion conçu pour stimuler les collaborations (Fig. 6). Tout autour de cet anneau central et isolé acoustiquement par des murs de verre, sont disposés en espace ouvert les bureaux et équipements de travail. Il n'existe pas de bureaux personnalisés, cette flexibilité de l'espace permet de recevoir de nouveaux collaborateurs sans avoir à perdre de temps pour leur allouer les ressources nécessaires.

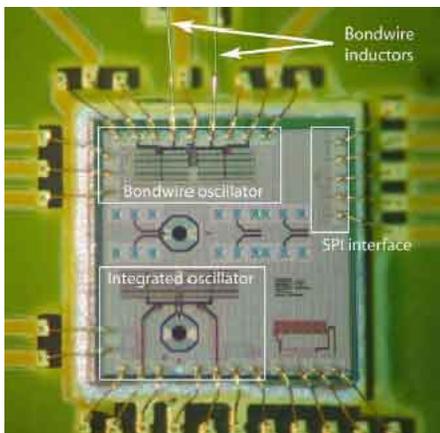
Le budget annuel du BWRC est de 6 millions de dollars. Il ne comprend pas les salaires des chercheurs qui sont pris en charge par l'université de Berkeley. Soixante pour cent du financement du centre proviennent des partenaires industriels. Le complément est apporté par différents contrats gouvernementaux: DARPA, NSF, ONR et MARCO\*.

*\*Microelectronics Advanced Research Corporation (MARCO) est une filiale de la Semiconductor Research Corporation (SRC) qui a été créée par le Semiconductor Industry Association (SIA) en 1982 pour stimuler les programmes de recherche universitaire dans le domaine des semi-conducteurs. SRC finance la recherche universitaire à hauteur de 30 millions de dollars annuel. 11 universités sont intégrées dans le dispositif. Les thèmes retenus sont : nanomatériaux atomiques et moléculaires, structures et matériaux ordonnés à une échelle nanométrique, simulation et calcul, nouveaux composants, architectures nanométriques. <http://fcrp.src.org/>*

### II.1.2 Les objectifs

Le BWRC a été créé dans le but d'explorer les possibilités actuelles et futures de développement de nouveaux systèmes intégrés de communication sans fil (System On Chip) basés sur les technologies CMOS avancées. Le centre a également pour vocation de former les scientifiques les plus compétents pour répondre aux problématiques liées au domaine des technologies sans fil.

Les programmes de recherche sont orientés vers la conception de systèmes intégrés à très basse consommation d'énergie et basés sur des algorithmes de communication avancée (Fig. 7).



**Figure 7 - Image d'un circuit développé par le BWRC en 2005: " A 100  $\mu$ W, 1.9GHz Oscillator with Fully Digital Frequency Tuning", Nathan M. Pletcher and Jan M. Rabaey, University of California, Berkeley**

Les quatre principaux domaines de recherche sont :

1. Conception analogique RF, circuits A/N/A et éléments passifs
2. Electronique numérique très basse consommation
3. Algorithmes de communication
4. Outils de conception et méthodologie

## II.2 Un modèle de collaboration

Le BWRC entretient de très fortes relations avec les grandes compagnies du domaine des technologies sans fil: Intel, Philips, STMicroelectronics, Infineon Technologies Hitachi Ltd Sun Microsystems, Cisco Systems, Agilent Technologies, Conexant Systems, etc. De façon plus détaillée, voici les règles qui sont appliquées au BWRC :

### II.2.1 Des partenaires industriels fortement impliqués

Dans de nombreux cas, le partenariat entre un laboratoire académique et un industriel se traduit par une relation contractuelle où le laboratoire reçoit de l'argent et s'engage à fournir à l'industriel les résultats escomptés. Au BWRC il en est tout autrement. Afin d'éviter les problèmes au détriment de l'avancement des projets et conserver un maximum de liberté au niveau des thèmes de recherche, aucun livrable et aucun engagement ne sont pris de la part du laboratoire.

Avec une participation financière modeste, 75K\$ ou 150K\$ annuel suivant les statuts, et une mise à disposition de ressources techniques, les industriels deviennent membres du consortium associé au laboratoire. Avec le statut le plus fort (150K\$), cette adhésion leur permet:

- de détacher du personnel dans les locaux du centre à Berkeley sur une période allant de 2 mois à quelques années.
- d'être membre du comité qui définit le choix des thématiques de recherche et qui met en place les roadmaps.
- de participer aux séminaires semestriels (cadre informel, sortie sur 2 jours) au cours desquels les nouveaux résultats sont présentés et discutés avec l'ensemble des acteurs.
- d'avoir un accès privilégié aux nouveaux résultats de recherche puisque leur diffusion dans le domaine public se fait en général 6 mois après.

### II.2.2 Diffusion rapide et publique de la propriété intellectuelle

La gestion de la propriété intellectuelle faite au BWRC s'inscrit dans la politique générale de l'université de Berkeley (et de toutes les autres University of California) qui tend à maintenir un environnement de recherche favorisant la création de connaissances nouvelles et leur diffusion libre vers un large public. Les résultats de recherche du BWRC sont largement diffusés à travers le site Internet (<http://bwrc.eecs.berkeley.edu/>), les publications scientifiques, les conférences et les workshops. Le dépôt de brevet ne fait

pas partie des objectifs du BWRC. Cette stratégie a pour but d'éviter les conflits de nature économique qui freinent l'avancement des projets de recherche. Dans les rares cas où un brevet souhaite être déposé, le BWRC encourage les industriels à le faire dans le cadre de leurs propres activités de recherche. En pratique, la plupart des partenaires industriels possèdent des petites structures de recherche sur le campus de Berkeley ce qui leur permet d'effectuer leurs propres travaux et déposer des brevets s'il y a lieu. Dans les cas assez peu fréquents où un chercheur ou un membre industriel est amené à déposer un brevet, la propriété est partagée entre l'université de Californie et le partenaire industriel selon les conditions définies par le règlement (University of California Policy).

Cette approche "ouverte" de la propriété intellectuelle fait partie de la culture de l'université et se traduit également au niveau de la manière dont les acteurs du BWRC travaillent ensemble. Les échanges entre les chercheurs et les industriels sont importants et toutes les informations sont partagées sans souci de confidentialité même entre les partenaires industriels qui sont en concurrence sur le marché des technologies sans fil.

### II.2.3 Des directeurs de recherche visionnaires

Une des principales motivations des chercheurs est de voir un jour leur résultat de recherche s'appliquer. Grâce à leurs interactions permanentes avec les acteurs du monde industriel, les chercheurs du BWRC possèdent une vision claire, globale et anticipative des futures technologies. Les projets de recherche sélectionnés sont suffisamment en avance de phase (>5ans) pour ne pas interférer avec les activités à court et moyen terme des partenaires industriels. De plus les entreprises choisies comme partenaires sont spécialisées dans un des domaines de recherche exploré de manière à ne pas démarrer de zéro mais en connaissance de l'état de l'art existant et profiter des résultats déjà acquis.

### II.2.4 Vision décloisonnée de la recherche

Les projets menés au BWRC débouchent sur la fabrication de prototypes qui démontrent la faisabilité d'un système complet.



Figure 8 - Développé par le BWRC, le premier émetteur sans fil intégré et auto-alimenté par une cellule solaire (PicoBeacon).

Clairement, ces projets impliquent de nombreuses disciplines scientifiques et un des facteurs clé de leur succès réside dans la distinction nette faite entre les fonctions techniques et les fonctions d'encadrement chargées de fournir aux chercheurs le temps et les ressources pour accomplir leurs travaux. Concernant les problèmes de communication entre les groupes liés à l'interdisciplinarité des projets, des sous-groupes de recherche sont mis en place avec à leur tête un étudiant leader chargé chaque semaine de présenter l'état d'avancement de son équipe. Un système de rotation permet de remplacer les chefs de groupe tous les 6 mois.

## II.3 Le point de vue d'un partenaire industriel

Au cours d'un entretien avec le responsable à Crolles (France, 38) de la collaboration entre STMicroelectronics et le BWRC, nous avons pu discuter du partenariat. La participation de l'entreprise a démarré dès la création du centre de recherche en 1998. Concrètement, sur une période de 3 ans, 4 ingénieurs expérimentés ont été détachés pour intégrer le laboratoire de Berkeley. Selon le responsable des opérations à Crolles, " aucun objectif précis de résultats n'avait été formulé initialement, nos représentants avaient pour rôle d'apporter leur expertise industrielle (conception RF analogique / numérique) en participant aux programmes de recherche qui nous intéressaient."

Entre 1998 et 2005, le fondateur STMicroelectronics a fourni au centre de Berkeley sa technologie, le support associé et l'accès au moyen de production. Grâce à cette collaboration, la technologie ST a permis au BWRC de fabriquer plus de 60 nouveaux prototypes de circuits RF. En pratique, plus de 80% de la part du silicium que ST Crolles offre à ses universités partenaires toutes confondues a été consommé par le BWRC. Parmi les collaborations que le responsable de Crolles entretient avec les universités américaines (Stanford, MIT, etc...), il souligne le dynamisme et l'originalité du BWRC. Concernant le bilan actuel, le message de l'industriel est enthousiaste. Les bénéfices de la collaboration sont de plusieurs natures:

### II.3.1 Rester à la pointe de la technologie

A travers les travaux du BWRC, STMicro accède à un ensemble de connaissances nouvelles essentielles pour améliorer sa vision de l'état de l'art et prévoir l'évolution à long terme des technologies. La présence au sein de ce laboratoire permet de connaître et d'investir les grandes tendances.

### II.3.2 Vitrine pour la technologie ST

La visibilité de la compagnie à travers la communauté scientifique a largement été renforcée grâce à la co-rédaction d'un article qui a reçu le prix du "best paper" décerné par l'International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) et à de nombreuses citations dans des publications internationales.

### II.3.3 Transferts de connaissances et compétences

Parmi les prototypes de circuits réalisés au BWRC, certains d'entre eux (low-energy FPGA, configurable computing, advanced coders, etc) ont directement été transférés du laboratoire et ré-exploités par STMicroelectronics. Dans le cadre du développement de nouveaux produits, une partie du travail réalisé au BWRC a été réutilisée en permettant ainsi de gagner du temps sur le développement (tests, caractérisation de la technologie, etc...).

Au niveau du transfert de compétences, à leur retour au sein de la compagnie, les personnes qui ont été détachées à Berkeley apportent de nouveaux savoir-faire techniques mais surtout de nouvelles approches de la collaboration et de la capacité à conduire des projets en équipe.

## Conclusion

Sur le campus de Berkeley, il existe plusieurs centres de recherche basés sur la coopération inter-universités/entreprises/gouvernement à l'image du BWRC (ex: Berkeley Sensor and Actuator Center, Berkeley Institut for Soft Computing, etc...). Pour obtenir les fonds qui conditionnent leur création, ces structures ont dû défendre leur projet de recherche au niveau national auprès des agences fédérales de recherche (DARPA, NIH, NSF, etc). A terme, leur financement est majoritairement assuré par les partenaires industriels. L'ensemble de ces petites structures de recherche (environ 30), qui est réparti sur 4 campus (Berkeley, Davis, Merced, et Santa Cruz) est supervisé par le Center for Information Technology Research in the Interest of the Society (CITRIS). CITRIS est un institut de recherche inter-universitaire qui regroupe plus de 60 partenaires industriels.

CITRIS ainsi que trois autres instituts californiens (QB3, CNSI, et Calit2) ont été fondés en 2000 par l'Etat, les universités publiques (University of California) et plus d'une centaine d'entreprises. Ces instituts (California Institutes for Science and Innovation, Cal ISI) disposent chacun d'une enveloppe budgétaire de 300 millions de dollars sur 4 ans (1/3 fonds publics Californien, 2/3 financement extérieur). Ce projet traduit une volonté de soutenir la recherche dans des domaines interdisciplinaires (biomédecine, bio-ingénierie, nanosystèmes, télécommunications et technologies de l'information.) critiques pour la croissance économique et la compétitivité mondiale de la Californie.

Les coopérations entre la recherche et l'industrie, les différentes universités ou les entreprises d'un même secteur, sont efficacement exploitées en Californie. L'exemple de l'industrie américaine du semi-conducteur a permis de démontrer les mérites de cette approche. En effet pendant le début des années 80, alors que le secteur rencontrait des difficultés, les industriels américains ont uni leurs forces en formant des consortia (SIA, SEMATECH, MARCO\*, etc...) pour mettre en place une feuille de route commune (National

Technology Roadmap for Semiconductor) et coordonner la recherche au sein des universités.

L'exemple du BWRC démontre qu'une organisation basée sur le concept de recherche ouverte - où chercheurs et industriels travaillent ensemble sur des problématiques communes - est efficace ; elle fait avancer la recherche et permet de transférer de nouvelles technologies. A une époque où l'avenir de la recherche française pose de multiples questions, les différentes expériences américaines semblent apporter quelques réponses.

Raphaël Allègre,

Attaché Scientifique Adjoint à San Francisco

[vi.me@consulfrance-sanfrancisco.org](mailto:vi.me@consulfrance-sanfrancisco.org)

## Références

- [1]. L'université publique de Californie a récemment publié un rapport complet sur la contribution du système universitaire à la croissance économique, à la santé et aux ressources de la communauté, <<http://www.universityofcalifornia.edu/economy/impactreports.html>>.
- [2]. Henry Chesbrough, "Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology", Boston: Harvard Business School Press, 2003, ISBN: 1-57851-837-7. Henry Chesbrough est actuellement professeur à l'école de management de Berkeley (Haas School).
- [3]. Hopping in Silicon Valley: The Micro-Foundations of a High Technology Cluster, <<http://www.oecd.org/dataoecd/58/46/32124907.pdf>>.
- [4]. Selon une étude réalisée par la National Science Foundation (NSF): Survey of Graduate Students and Postdocs, <<http://www.nsf.gov/statistics/>>.
- [5]. Source, <<http://www.pwcmoneytree.com/moneytree/index.jsp>>. A consulter aussi le rapport de F. Verdier et C. Lerouge: "Le Capital Risque dans la Silicon Valley", Décembre 2005, <[http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05\\_102.htm](http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_102.htm)>.
- [6]. <<http://www.intel.com/research/university/index.htm>>.
- [7]. Robert D. Hof, "The Power Of Us", BusinessWeek, 20 juin 2005, <[http://www.businessweek.com/magazine/content/05\\_25/b3938601.htm](http://www.businessweek.com/magazine/content/05_25/b3938601.htm)>. <<http://www.innocentive.com/>>.
- [8]. <<http://www.mlnm.com/index.asp>>
- [9]. Bob Brodersen, "BWRC - Past, Present and Future", <<http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Background/History.htm>>.

## Bibliographie

### «Open Innovation»

Henry Chesbrough, "Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology", Boston: Harvard Business School Press, 2003, ISBN: 1-57851-837-7.

A New Paradigm for Managing Technology Presentation to OECD Conference on New Business Strategies for R&D October 22, 2001, Henry Chesbrough Assistant Professor and Class of 1961 Fellow Harvard Business School, <<http://www.oecd.org/dataoecd/6/23/2461567.pdf>>. <<http://www.openinnovation.net/>>

## ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

NANOSCIENCES, MICROELECTRONIQUE,  
MATERIAUX

Février 2006

Pour vous abonner gratuitement à la lettre  
ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES  
et être informé en priorité de la disponibilité  
des prochains numéros, il suffit d'envoyer un  
courrier électronique à l'adresse:

*subscribe.be.etatsunis@adit.fr*

Vous recevrez en retour une confirmation  
d'abonnement.

Directeur de la publication :  
Michel Israël

Rédacteurs en chef :  
Roland HERINO  
Christophe LEROUGE

Rédacteurs :  
Raphaël ALLEGRE  
Rémi DELVILLE

Mise en page et Publication :  
Rémi DELVILLE  
Raphaël ALLEGRE

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES  
est une publication mensuelle de la Mission pour la Science  
et la Technologie de l'Ambassade de France aux Etats-Unis,  
dont la diffusion est assurée par l'ADIT

Vous y trouverez un archivage des anciens numéros de la lettre et  
découvrirez aussi les autres publications de la Mission  
pour la Science et la Technologie

-S&T Presse  
-Flash TIC  
-Revue santé Etats-Unis  
-Revue de l'environnement  
-Etats-Unis Espace  
-Etats-Unis Microélectronique/ Matériaux  
(archives précédant la fusion)

Retrouvez ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES ainsi que  
toute l'actualité technologique aux Etats-Unis et dans le reste  
du monde sur le site:

<http://www.bulletins-electroniques.com/>

### FICHES STRATÉGIQUES:

- Initiative jeunes entrepreneurs - Mobilité de jeunes chercheurs/ entrepreneurs vers la France (Sep 2005)
- La place de la Science dans le nouvel agenda de la NASA (Sep 2005)
- La Politique Fédérale de R&D en Nanotechnologies aux Etats Unis (Sep 2005)
- Le développement technologique dans la région de San Francisco (Sep 2005)
- Le Devenir des Post-doctorants en Amérique du Nord (Sep 2005)
- Observation de la Terre: La contribution américaine à GEOSS (Sep 2005)
- Bio-Pharming – Des plantes génétiquement modifiées pour produire des médicaments, (Jan 2005)
- Comment fonctionnent les universités américaines ? (Jan 2005)
- L'environnement au sortir des élections américaines : bilan et perspectives, (Jan 2005)
- Nanoélectronique - USA, (Jan 2005)
- Préserver l'eau dans l'agriculture texane : contexte et solutions, (Jan 2005)
- SpaceShipOne : le début ou la fin du rêve ? (Jan 2005)

### DOSSIERS ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

- Octobre 2005 : Sciences Physiques : Nanotechnologies et santé publique - A l'interface du nanomonde - De nouvelles cellules photovoltaïques - Du nouveau dans les semiconducteurs
- Août 2005 ; La photolithographie
- Février 2005 : L'électronique grand public aux Etats-Unis
- Juillet 2004 : L'International Roadmap for Semiconductors
- Mai 2004 : Les nanocomposites aux Etats-Unis

### NOTES ET RAPPORTS D'ETUDES:

- Janv 2006 : Regards français sur la Silicon Valley
- Janv 2006 : Présence française dans le domaine High Tech dans la région de San Francisco
- Sept 2005 : Les efforts de Recherche et Développement en nanotechnologies aux USA
- Sept 2005 : Enseignement universitaire et recherche : comparaison entre les USA, le Japon et la France
- Jun 2005 : Enquête sur le devenir des post-doctorants en Amérique du Nord
- Mai 2005 : La Politique de R&D en Nanotechnologies aux Etats-Unis
- Mar 2005 : La spintronique aux Etats-Unis - Un Aperçu des Recherches
- Fev 2005 : Eau et agriculture au Texas
- Oct 2004 : Fonctionnement des universités américaines : Qui Propose ? Qui décide ?
- Sep 2004 : Nouvelles Modalités d'attribution des visas aux US, quelle influence sur la communauté scientifique?