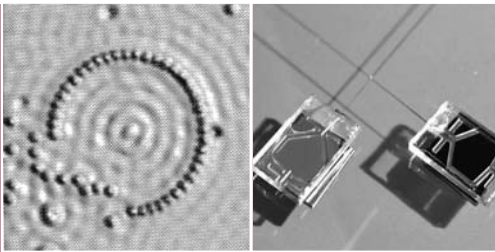


## RAPPORTBOURGOGNE



2006RB-02 > Mai 2006

# Les nanotechnologies : bénéfices et risques potentiels

**Bernard Sinclair-Desgagné** (CIRANO et HEC Montréal)

**Dina Feigenbaum** (CIRANO et HEC Montréal)

**Albert Nsamirizi** (CIRANO)

Les Rapports bourgogne sont des documents de synthèse portant sur des questions d'intérêt général produits par des chercheurs du CIRANO. Ils contribuent à alimenter la réflexion et le débat public sur des questions d'actualité.

Le CIRANO est un centre de recherche multidisciplinaire qui a pour mission l'accélération du transfert des savoirs entre le monde de la recherche et celui de la pratique.

## **Les partenaires du CIRANO**

### **Partenaire majeur**

Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation

### **Entreprises partenaires**

Alcan inc.  
Banque du Canada  
Banque Laurentienne du Canada  
Banque Nationale du Canada  
Banque Royale du Canada  
Bell Canada  
BMO Groupe financier  
Bombardier  
Bourse de Montréal  
Caisse de dépôt et placement du Québec  
Fédération des caisses Desjardins du Québec  
Gaz Métro  
Hydro-Québec  
Pratt & Whitney Canada  
Raymond Chabot Grant Thornton

### **Autres partenaires gouvernementaux**

Industrie Canada  
Ministère des Finances du Québec  
Ville de Montréal

### **Partenaires universitaires**

École Polytechnique de Montréal  
HEC Montréal  
McGill University  
Université Concordia  
Université de Montréal  
Université de Sherbrooke  
Université du Québec  
Université du Québec à Montréal  
Université Laval

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site Web.

Les idées et les opinions émises dans cette publication sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.

© 2006 Bernard Sinclair-Desgagné, Dina Feigenbaum, Albert Nsamirizi. Tous droits réservés.

Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©.

Photos de la couverture: à gauche, cercle d'atomes de fer sur surface de cuivre, © IBM;  
à droite, biopuces Projet MeDICS - Contrôle du micro dispositif de tri cellulaire © P. Stroppa/CEA

# Table des matières

<b>Introduction</b>	05
Définitions	06
Le microscope à effet tunnel	08
<b>1. Des applications</b>	11
1.1 La nanoélectronique	11
1.2 Les nanomatériaux	17
1.3 Les nanobiotechnologies	23
<b>2. Données économiques et politiques nationales</b>	30
2.1 Investissements	30
2.2 La politique du Canada	32
2.3 La politique du Québec	33
<b>3. L'évaluation des risques</b>	39
3.1 L'environnement	40
3.2 L'entreposage	40
3.3 Les risques pour la santé	40
<b>4. Conclusion</b>	45
<b>Bibliographie</b>	47



### **Bernard Sinclair-Desgagné**

Titulaire d'un Ph.D. en recherche opérationnelle et en gestion de la School of Management de Yale University, Bernard Sinclair-Desgagné est professeur titulaire au Service de l'enseignement des affaires internationales de HEC Montréal, et titulaire de la Chaire en économie internationale et de gouvernance. Ses domaines de recherche sont: la théorie de la firme, l'organisation industrielle et la stratégie, l'économie de l'environnement et le risque technologique.

Fellow CIRANO, membre de l'équipe RTES (Risques technologiques, environnementaux et à la santé), il est également cotitulaire de la Chaire Électricité de France (EDF) sur le Développement durable - École Polytechnique de Paris.

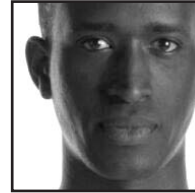
**[bernard.sinclair-desgagne@cirano.qc.ca](mailto:bernard.sinclair-desgagne@cirano.qc.ca)**



### **Dina Feigenbaum**

Économiste, titulaire d'un D.Sc. en génie informatique et des systèmes, et d'un M. Sc. en génie de la production à l'Université fédérale de Rio de Janeiro, Dina Feigenbaum a eu l'occasion de pratiquer l'enseignement et de diriger vingt-neuf thèses de maîtrise et six de doctorat dans des domaines variés de l'économie, de la recherche opérationnelle et de l'analyse de décision et de la politique environnementale. Actuellement, ses intérêts de recherche portent sur les questions relatives à l'économie internationale, au développement durable, aux nanotechnologies et à leurs enjeux.

**[dina.feigenbaum@cirano.qc.ca](mailto:dina.feigenbaum@cirano.qc.ca)**



### **Albert Nsamirizi**

Diplômé en 2002 de l'École Polytechnique de Montréal, Albert Nsamirizi a participé, dès la fin de ses études, aux travaux de la Chaire de nanotechnologies de l'École Polytechnique, s'intéressant plus particulièrement à la transmission de données entre le NanoWalker et la plate-forme de contrôle. Au CIRANO, il a pris part aux recherches menées également dans le domaine des nanotechnologies.

**[albert.nsamirizi@polymtl.ca](mailto:albert.nsamirizi@polymtl.ca)**

## Ce rapport CIRANO

Ce rapport CIRANO est une introduction aux problématiques des nanotechnologies. Le but est de faire un survol de la question, de définir ce qu'est la nanotechnologie, d'évaluer sa portée en termes d'applications, d'en connaître les principaux acteurs et de pouvoir se faire une idée des dangers potentiels que pourrait comporter ce domaine en effervescence. Ce texte est cependant loin de constituer un rapport complet sur la question tellement celle-ci est vaste et en expansion.

Les nanotechnologies représentent vraisemblablement le nerf de la prochaine révolution technologique. En émergence depuis la fin des années 90, leurs percées vont bouleverser tous les champs technologiques et scientifiques. Les nanotechnologies et les nanosciences ont la particularité scientifique par rapport aux autres champs que celles-ci opèrent à des dimensions nanométriques, où la matière que l'on manipule présente de nouvelles propriétés jusqu'alors inutilisées. Le succès de recherches dans le domaine des nanotechnologies ne peut par contre résulter que de la convergence des efforts de plusieurs acteurs opérant dans différentes disciplines scientifiques et technologiques (informatique, mathématiques, génie, chimie, physique, biologie, etc.).

Les différentes applications en nanotechnologies peuvent être regroupées en trois principaux champs : les nanomatériaux, la nanoélectronique et les nanobiotechnologies.

Les nanomatériaux représentent le domaine d'application le plus prometteur en matière de commercialisation à court terme. En agissant directement sur l'assemblage des particules formant certains matériaux conventionnels, on est capable d'en améliorer considérablement les propriétés physiques (comme la résistance ou la conductivité).

En nanoélectronique, les limites de miniaturisation que connaîtront bientôt les techniques habituelles de photolithographie seront dépassées grâce à une série de techniques nouvelles, certaines plus prometteuses que d'autres. Les transformations dans le domaine de l'électronique qui découleront de ces percées seront radicales (nanorobots, bionique, etc.).

Les nanotechnologies sont enfin porteuses de nombreuses promesses pour la santé humaine. Elles permettront en effet d'observer la nature de plus près (de l'intérieur même des cellules) afin de corriger ses dysfonctionnements (qu'on pense, par exemple, à des nanorobots agissant dans nos artères comme des plombiers capables de prévenir l'engorgement des conduits en détruisant le cholestérol).

Toute nouveauté comporte cependant des aspects moins roses. Comme l'état d'avancement des nanosciences et des nanotechnologies ne permet pas encore d'en connaître et bien évaluer les dangers, la tendance actuelle est de minimiser ceux-ci, étant donné l'ampleur des applications envisagées. Le problème est néanmoins soulevé de plus en plus souvent dans la communauté scientifique. En matière d'environnement, les risques potentiels seraient liés au fait que le marché pourra mettre en circulation des nanomatériaux aux propriétés certes avantageuses, mais dont la contrepartie serait l'absence de techniques de recyclage testées et approuvées. La production et l'entreposage des nouveaux matériaux sont aussi sujets à risques, étant donné la réactivité accrue de certains d'entre eux. Dans le domaine de la santé, quelques analyses de risque ont été menées. La principale difficulté de ce genre d'étude vient du fait que la grande diversité de nanomatériaux déjà existants fait qu'il n'y aura pas de diagnostic uniforme. Des tests ont ainsi été effectués

sur des rats en laboratoire pour évaluer les effets des nanotubes de carbone sur la santé, et les conclusions ne sont pas unanimes. Il reste donc encore beaucoup de travail à faire. Quoi qu'il en soit, on peut d'ores et déjà anticiper que l'analyse des impacts sur l'environnement et la santé humaine des nanoproduits devra se fonder sur une approche holistique qui tienne compte de l'ensemble du cycle de vie du produit ou du procédé.

En somme, les nanotechnologies sont une innovation radicale qui transformera éventuellement maints aspects de la vie économique, et qui pourrait aider à tracer la voie du développement durable. Il est toutefois nécessaire d'améliorer rapidement l'analyse des risques liés à ces technologies, afin d'éviter des écueils similaires à ceux qui entravent toujours le développement de certaines autres technologies (par exemple, celles qui découlent du génie génétique).

# Introduction

**A** l'échelle mondiale, les nanotechnologies suscitent de plus en plus d'intérêt et sont en voie de constituer le cœur de la prochaine révolution industrielle. Le développement des sciences nous a amenés à un point de convergence où les technologies de pointe sont à l'étape de la manipulation de la matière dans ses plus petits éléments constitutants. Dès 1959, le physicien visionnaire américain Richard Feynman a lancé le défi à la communauté scientifique d'aller au cœur de la matière pour la transformer, molécule par molécule. Mais à cette époque, une telle vision ne pouvait être concrétisée avant l'arrivée de certaines percées scientifiques comme celle qui fut apportée en 1981 par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer : le microscope à effet tunnel. Grâce à cet outil, on pouvait enfin « voir » la matière à l'échelle atomique.

Les activités de recherche vers la fin des années 80 se répartissaient entre différents champs d'intérêts non reliés. L'auto-assemblage chimique des molécules reçut de plus en plus d'attention dans ces années-là, avec d'importantes contributions comme celle de Jean Marie Lehn, pionnier de la chimie supramoléculaire, qui reçut le prix Nobel de chimie de 1987. Il travailla sur des molécules « hôtes » présentant des cavités de tailles et de formes bien définies capables de reconnaître et de se lier à de plus petites molécules de formes et de tailles correspondant à celles des cavités, comme une clé est acceptée par une serrure. Ce processus, qui fait intervenir une véritable « reconnaissance moléculaire », apparaît comme un phénomène fondamental de la vie, responsable de l'élaboration et de la transmission de l'information à l'échelle moléculaire. Une autre découverte marquante dans ce cheminement est la découverte de la fameuse molécule « fullerène », structure de soixante atomes de carbone. Enfin en 1991, S. Iijima découvre les nanotubes de carbone, un élément incontournable des nanotechnologies. Mais jusqu'en 1996 les nanosciences sont reléguées au titre de « science-fiction », car les applications ne sont pas encore publiquement reconnues. En 1996, aux États-Unis, des groupes d'experts commencent à se réunir régulièrement pour discuter des plans et programmes dans le domaine des nanosciences

Dès 1959, le physicien visionnaire américain Richard Feynman a lancé le défi à la communauté scientifique d'aller au cœur de la matière pour la transformer, molécule par molécule.

et nanotechnologies. L'un de ces groupes continue officiellement ses activités jusqu'en 1998, où l'on crée l'Interagency Working Group on Nanotechnology (IWGN) qui deviendra plus tard, en 2000, le National Nanotechnology Initiative (NNI), ce qui marque le début de l'ère des nanosciences.

## Définitions

Voici quelques définitions des acteurs actifs de la nanotechnologie retrouvées dans la littérature et sur les sites Internet :

« Désigne les techniques que développe la microélectronique pour se faire toujours plus miniaturiser et parvenir à fabriquer des objets dont les dimensions s'approchent du nanomètre. »

(Définition tirée du livre *Demain le nanomonde. Voyage au cœur du minus-cule*, Jean-Louis Pautrat, Éditions Fayard, Le temps des sciences, 2002.)

« Les nanosciences et les nanotechnologies explorent et exploitent les phénomènes qui différencient les matériaux et les systèmes structurés à l'échelle nanométrique d'autres structures aux échelles plus grandes. Par le contrôle, la caractérisation et la compréhension au niveau des unités fondamentales (les atomes et les molécules), de nouveaux matériaux et de nouvelles structures peuvent être conçus pour offrir des propriétés physiques, chimiques et biologiques nouvelles ou considérablement améliorées. »

(Définition tirée du site Web de NanoQuébec, le réseau québécois de recherche en nanosciences et nanotechnologies.)

« La Nanoscience est l'étude des phénomènes et de la manipulation des matériaux à l'échelle atomique, moléculaire et macromoléculaire; où les propriétés diffèrent de façon significative de celles à des échelles plus grandes. »

« La Nanotechnologie est la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes en contrôlant la forme et la taille à l'échelle nanométrique. »

(Définitions tirées du site Web de la Royal Society and Royal Academy of Engineering.)



La définition qui sera retenue pour ce rapport sera celle qui apporte un minimum de restrictions, afin de ne pas inclure dans le domaine des nanotechnologies tous les scientifiques en hautes technologies, sans pour autant négliger le lien d'interdépendance entre les différents champs reliés aux nanotechnologies :

« La nanoscience est donc le domaine qui porte sur l'étude des phénomènes observés dans des structures et systèmes : (1) dont la taille, dans au moins une dimension de l'espace, s'exprime en nanomètres ; et (2) qui possèdent des propriétés découlant spécifiquement de cette taille nanométrique. Les nanotechnologies sont quant à elles le domaine qui s'intéresse aux applications de ces phénomènes. »

(Définition tirée du document *Les Nanotechnologies*, la maîtrise de l'infiniment petit, avis publié par le Conseil de la science et de la technologie, 2001.)

Le caractère particulier des nanotechnologies qui en fait le domaine le plus prometteur des nouvelles technologies est le fait qu'à l'échelle à laquelle on opère, les lois de la physique conventionnelles ne s'appliquent plus de la même manière. Les propriétés physiques, chimiques, biologiques à l'échelle nanométrique ne peuvent être directement déduites de celles qui sont connues à ce jour, aux échelles habituelles. Si on arrive à manipuler la matière à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire à l'échelle des plus petits éléments la constituant, on sera en mesure de modéliser la matière selon nos besoins. Les conséquences prévisibles sont alors presque infinies. Certains parlent déjà de troisième révolution technologique, après la révolution industrielle et celle de la microélectronique.

Une autre particularité notable est la méthodologie scientifique à la base des nanotechnologies : on ne peut se lancer dans un tel domaine sans compter sur la contribution de plusieurs champs des sciences et technologies de pointe tels que l'informatique, les mathématiques, le génie, la chimie, la physique, la biologie. Les percées majeures dans les nanotechnologies seront le fruit de plusieurs savoirs interdisciplinaires mis en commun et auront des répercussions bénéfiques dans chacun de ces domaines. Les nanotechnologies sont en fait une illustration de la convergence et de l'interdépendance de plus en plus grandissante entre les différents champs technologiques auparavant distincts ou peu reliés.

Le caractère particulier des nanotechnologies qui en fait le domaine le plus prometteur des nouvelles technologies est le fait qu'à l'échelle à laquelle on opère, les lois de la physique conventionnelles ne s'appliquent plus de la même manière.

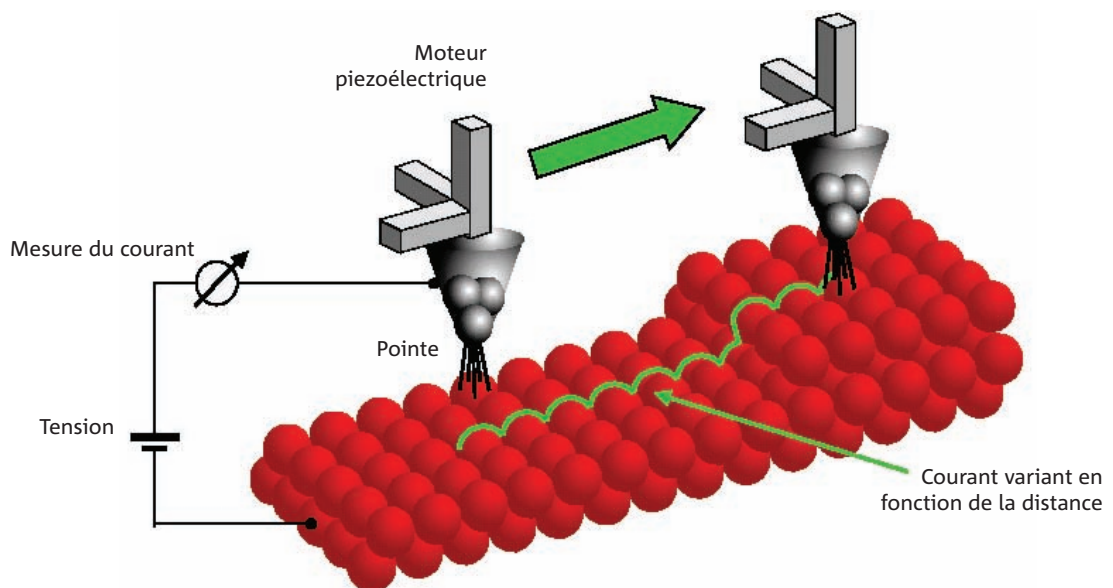
## Le microscope à effet tunnel

Invention marquante et indispensable aux nanosciences, le microscope à effet tunnel a été inventé par des chercheurs d'IBM, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, Prix Nobel de physique en 1986. Outil de haute précision permettant de « voir » les surfaces des matériaux avec une résolution atomique, il peut opérer sous plusieurs conditions extrêmes de pression, température et magnétisme, et servir d'outil de structuration des surfaces et d'étude des propriétés électroniques des matériaux.

On approche une pointe très fine au-dessus d'une surface en appliquant une tension entre les deux. Un courant peut s'établir lorsque la pointe est à quelques nanomètres de la surface, même si elle ne la touche pas : c'est l'EFFET TUNNEL. L'intensité de ce courant dépend avec une grande sensibilité de la distance entre la pointe et la surface. Lorsqu'on déplace la pointe au-dessus de la surface, il suffit d'enregistrer les variations du courant en fonction de la position de la pointe pour obtenir une représentation de la topographie de la surface.

**Figure 1**

Le principe du microscope à effet tunnel

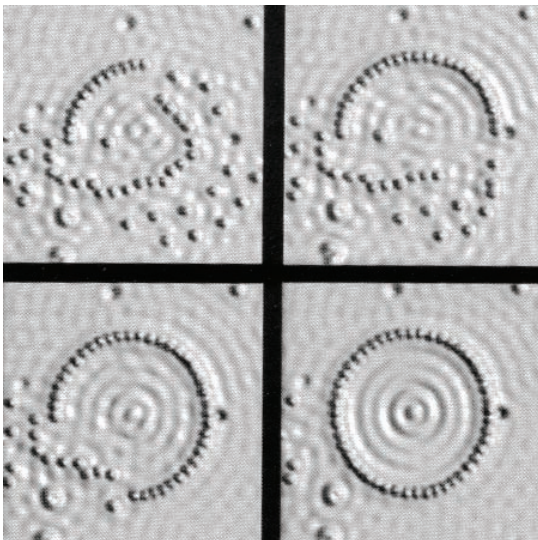


## Exemples de manipulations

Voici deux illustrations de la précision de manipulation qu'on peut atteindre à l'aide du microscope à effet tunnel. Il est possible, comme le montre la figure 2, de former un cercle d'atomes de fer déposés sur du cuivre. Au début, les atomes sont simplement déposés au hasard sur la surface de cuivre. La pointe du microscope sert ensuite à les disposer de façon à former un cercle. Une fois le cercle complété, les ondes électroniques qui se propagent en surface percutent les atomes de fer et forment les vaguelettes observées à l'intérieur du cercle. Toujours avec des atomes de fer sur du cuivre, des chercheurs ont réussi à écrire le caractère japonais «kanji» qui signifie «atome» (figure 3).

**Figure 2**

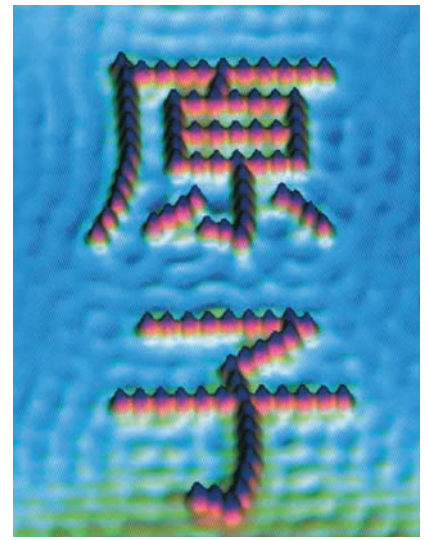
Cercles d'atomes de fer sur surface de cuivre



© IBM

**Figure 3**

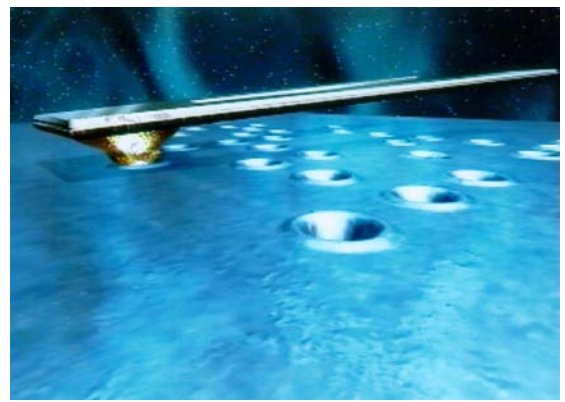
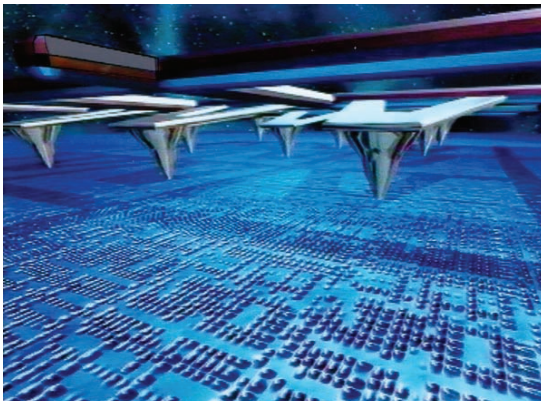
Écriture à l'échelle atomique



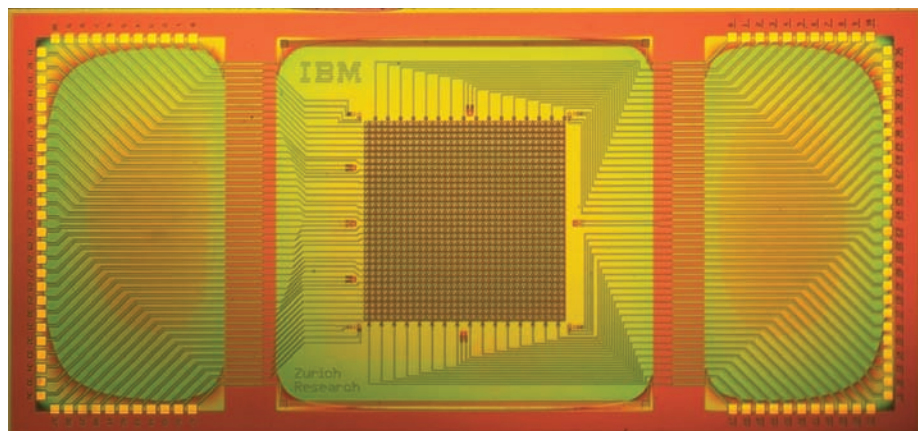
© IBM

À la suite de cette découverte marquante, IBM s'est lancé dans le projet Millipede qui utilise le parallélisme pour augmenter l'efficacité de la méthode. Il s'agit d'un réseau de 32 x 32 (1024) pointes pouvant toutes écrire sur un disque d'enregistrement, chaque pointe pouvant se déplacer indépendamment des autres. Une échancrure de 80 nm dans le disque constitue le « 1 » binaire, et son absence un « 0 ». IBM a ainsi été capable d'atteindre des densités de 30 Gb/cm<sup>2</sup>.

**Figure 4**  
Millipede en action



**Figure 5**  
Circuit électrique contrôlant les 1024 pointes qui se rejoignent dans un carré de 3 mm x 3 mm



# Des applications

**O**n peut regrouper les applications des nanotechnologies en trois principaux champs, à savoir la nanoélectronique, les nanomatériaux et les nanobiotechnologies.

## 1.1 La nanoélectronique

### 1.1.1 La course à la miniaturisation (loi de Moore)

La miniaturisation des composants électroniques des ordinateurs a été un élément important dans le développement des nanotechnologies, et ce, de deux manières. D'une part, ce besoin de miniaturiser est une des sources de motivation scientifique à la base de la naissance des nanotechnologies. D'autre part, le développement de l'informatique résultant de cette miniaturisation profite en retour à l'essor des nanotechnologies qui nécessitent le support d'une informatique de plus en plus puissante.

Depuis les débuts de l'informatique, la fameuse loi de Moore a servi à décrire et prédire la rapidité avec laquelle la miniaturisation des transistors s'effectue. Gordon Moore, cofondateur du leader mondial Intel, a affirmé en 1975, après avoir révisé ses calculs, que le nombre de transistors sur une puce électronique doublerait tous les deux ans (certains sources affirmant que cette période serait de dix-huit mois).

La course vers la miniaturisation dans le domaine électronique est une logique soutenue par deux bonnes raisons. Premièrement, d'un point de vue technologique, il est prouvé que, plus on réduit la taille d'un transistor (jusqu'à une certaine limite, comme nous le verrons plus loin), moins il y a de risques qu'il présente des anomalies le rendant non fonctionnel. Deuxièmement, la rentabilité économique de la fabrication de composants électroniques est accrue si la miniaturisation des transistors permet d'inclure plus de circuits sur une même plaque de silicium.

D'un point de vue technologique, il est prouvé que, plus on réduit la taille d'un transistor, moins il y a de risques qu'il présente des anomalies le rendant non fonctionnel.



## Les lois de l'optique imposent une limite à la réduction des motifs à reproduire.

Ainsi, dans les premières semaines de mars 2000, les compagnies Intel et Advanced Micro Devices (AMD) mirent sur le marché les premiers processeurs fonctionnant à un GHz. À ce moment-là, certains analystes déclarèrent que les besoins du marché pouvaient amplement être satisfaits avec de telles performances. Trois ans plus tard, pourtant, la concurrence aidant, le processeur le plus puissant d'AMD pouvait monter jusqu'à 3,2 GHz à un coût de 464 \$ US, alors qu'à ses débuts, le Pentium III de un GHz coûtait 990 \$ US. Cette ascension fulgurante est toutefois en train de connaître sa fin car la loi de Moore va bientôt rencontrer les limites physiques imposées par les techniques de photolithographie actuelles.

### 1.1.2 Les limites de la photolithographie (ou la loi de Moore contrecarrée)

La fabrication d'un circuit intégré utilise la réduction photographique. Les motifs des transistors, dessinés à grande échelle sur un masque, sont réduits et reproduits à la surface du silicium dans de la résine photosensible. La lithographie est suivie d'une étape de gravure à l'aide d'un plasma ou avec un acide pour retranscrire les motifs dans le silicium (voir figure 6).

Les lois de l'optique imposent une limite à la réduction des motifs à reproduire. Ces lois indiquent que la résolution maximale (la plus petite distance entre deux traits) décroît avec la longueur d'onde de la lumière utilisée dans le procédé et est inversement proportionnelle à l'ouverture numérique, qui mesure la qualité de la lentille, donc de l'objectif photographique utilisé. Il s'agit donc d'utiliser des longueurs d'onde de plus en plus courtes dans les étapes de fabrication des circuits intégrés. On se tourne de nos jours vers l'utilisation de lasers excimères émettant à des longueurs d'onde de 248, voire 193 nm (comparativement à la lumière rouge se situant à 600 nm ou l'ultraviolet inférieur à 440 nm).

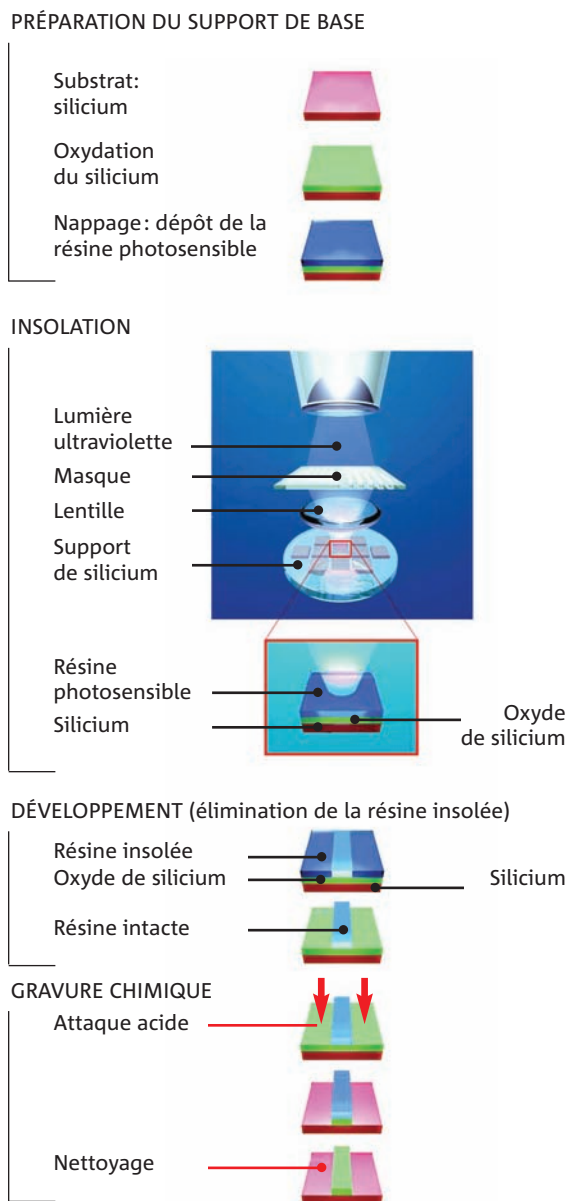
### 1.1.3 Les solutions pour repousser les limites de la lithographie

La solution idéale en matière de longueur d'onde courte est celle qui est offerte par les **rayons X** qui peuvent descendre à moins d'un nanomètre.

Par contre, deux problèmes font leur apparition. Premièrement, les rayons X traversent la matière, la différence de perméabilité des matériaux dépendant de leur densité. Les masques pour cette technique sont donc fabriqués à l'aide de matériaux à numéro atomique élevé comme l'or, qui absorbe bien les rayons X.

On peut fabriquer un bon masque en déposant une couche mince (un micron) d'or sur une lamelle de silicium qui, elle, absorberait mal les rayons X. Deuxièmement, on ne peut faire d'image avec les rayons X. Les matériaux absorbants permettant d'obtenir une ombre portée seront une maigre compensation pour contrer le fait qu'on ne peut bénéficier de la réduction des dimensions apportées par le système optique traditionnel. Le motif sur le masque (voir figure 6) devra être de la même taille que le motif final désiré. Donc le masque pour rayons X doit être fabriqué à l'aide d'une autre technique. Par ailleurs les

**Figure 6**  
La photolithographie optique



La dernière solution,  
plus prometteuse, est  
celle des faisceaux  
d'électrons. Le  
principe de base est  
similaire à celui du  
tube cathodique des  
téléviseurs.

effets d'ombre portée sont très difficiles à contrôler de manière efficace et peu coûteuse. Pour toutes ces raisons, la solution des rayons X restera encore sans applications, étant dépendante de percées dans d'autres domaines.

Une autre solution envisagée plus sérieusement est celle apportée par «**l'Extrême UV**». Il s'agit de rayons UV de très courte longueur d'onde: 10 nm. Ces rayons présentent aussi l'avantage d'être manipulables et focalisables comme la lumière du visible. Le problème vient de la façon dont il est possible actuellement de produire et d'utiliser ces rayons. Pour les produire, il faut exciter violemment un gaz rare tel que le xénon ou le krypton en l'éclairant avec un laser de grande puissance. Une fois les rayons émis, ils doivent être maintenus sous vide, sinon ils sont absorbés par l'air. Les matériaux utilisés actuellement en optique ne sont pas appropriés pour ces rayons qu'ils absorberaient au contact. Avant de pouvoir bénéficier des avantages de l'extrême UV, il faudra donc inventer des sources, miroirs et résines photosensibles adaptés à ce type de rayons.

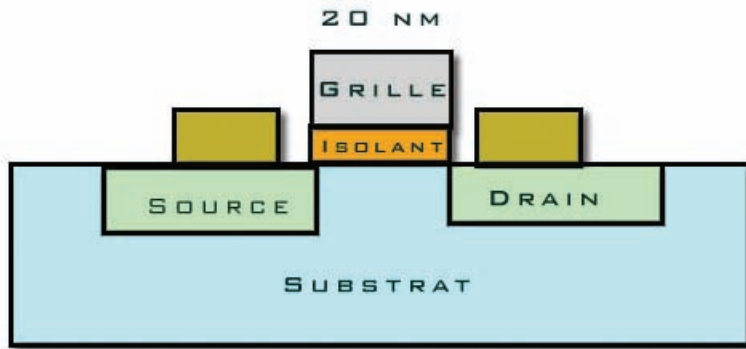
La dernière solution, plus prometteuse, est celle des **faisceaux d'électrons**. Le principe de base est similaire à celui du tube cathodique des téléviseurs. Cette option présente deux avantages considérables: le diamètre du faisceau peut être très petit (10 nm ou moins) et le dessin du motif final est réalisé en déplaçant le faisceau d'électrons, et non pas en utilisant un masque prédéfini. Par contre, ce déplacement n'est pas une mince affaire. En effet, il faut donner au faisceau la bonne intensité à combiner avec la bonne vitesse de déplacement, tout en évitant le recouvrement (effets de surexposition). Autre problème: cette méthode est adaptée pour tracer des traits et non pour imprimer de grandes surfaces, ce qui nécessite de tracer un grand nombre de traits rapprochés, tout en augmentant le temps et le coût de production. La technique de lithographie électronique sera donc consacrée à la fabrication de masques maîtres dont le coût de fabrication sera amorti en les utilisant pour fabriquer un grand nombre de microcircuits.

Combinée à la lithographie conventionnelle, cette technique peut s'avérer très utile: le masque utilisé en photolithographie comporte les plus gros motifs, et la lithographie électronique s'occuperait de dessiner les plus petits motifs, impossibles à réaliser à l'aide de la lumière ultraviolette. À l'aide de cette combinaison, un transistor dont la longueur de canal est de 20 nm (le plus petit transistor fonctionnel) a été mis au point au LETI (Laboratoire d'électronique) à Grenoble, en France, en 1999.

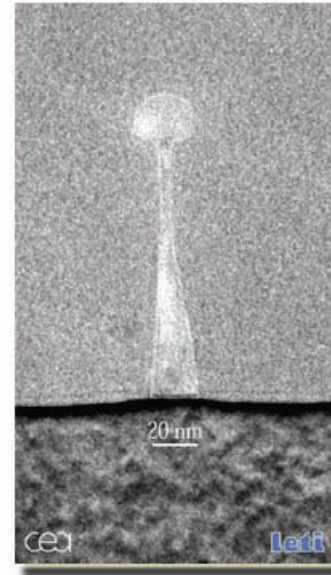


Figure 7

Le plus petit transistor fonctionnel



© CEA/LETI



#### 1.1.4 Un problème à prévoir : l'effet tunnel

Un problème majeur reste à surmonter une fois que la miniaturisation nous aura amenés à une finesse de gravure de l'ordre de 5 nm (comme le prévoit Intel d'ici 2013) : le courant de fuite. En effet, le même principe à l'origine de l'invention du microscope à effet tunnel s'applique. Sans que le contrôle par la grille soit activé, il est fort probable que les charges se déplacent de la source au drain, provoquant ainsi des problèmes de logique dans le circuit intégré.

#### 1.1.5 Les solutions de rechange à la lithographie classique

Les techniques présentées ci-dessus ne relèvent pas des nanotechnologies et ne présentent pas encore de résultat concluant et prometteur pour l'avenir. Il faut donc se tourner vers d'autres avenues : l'électronique moléculaire et les dispositifs nanoélectroniques à l'état solide.

##### L'électronique moléculaire

Lorsque soumises à un courant électrique, certaines molécules changent de forme après absorption d'un électron et reprennent leur forme initiale après son relâchement. La logique binaire peut donc s'appliquer.

À l'université de Californie à Los Angeles (UCLA), en 2001, des chercheurs ont mené des travaux permettant de synthétiser une molécule agissant comme un

commutateur. Ils s'intéressent à des molécules comme les caténanes et les rotaxanes, qui peuvent être produites avec les moyens traditionnels de la chimie de synthèse. Il serait possible de fabriquer de façon peu coûteuse des transistors, des commutateurs et des résistances. Les chercheurs espèrent pouvoir un jour créer des circuits en déposant les molécules sur une plaque de plastique, par exemple, pour qu'elles s'assemblent d'elles-mêmes par la suite et forment un réseau.

L'électronique moléculaire présente deux avantages :

- un coût faible, puisqu'elle relève de la chimie de synthèse traditionnelle;
- une échelle nanométrique, donc plus de capacité de calcul (100) et de mémoire (1000);

mais aussi un gros désavantage :

- un réseau constitué de molécules entraîne beaucoup d'erreurs d'assemblage; par exemple, les trois quarts des 864 puces du TERAMAC étaient défectueuses.

#### **Les dispositifs nanoélectroniques à l'état solide**

Ces dispositifs sont divisés en quatre champs : les dispositifs à effet tunnel résonnant, les points quantiques, les transistors à un seul électron et les fils quantiques. Toutes ces nouvelles techniques encore à l'étude se heurtent aux mêmes contraintes : relier les différents éléments pour en faire des circuits est une tâche ardue, parce qu'en utilisant des fils métalliques conventionnels on doit faire face à l'effet tunnel; les fils électriques perdent en fiabilité lorsque trop réduits en taille (surtout à une forte température où ils se cassent plus facilement).

Les fils électriques perdent en fiabilité  
lorsque trop réduits en taille  
(surtout à une forte température  
où ils se cassent plus facilement).

## 1.2 Les nanomatériaux

Ce qui distingue les matériaux ordinaires des nanomatériaux est la taille des grains qui passent de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de nanomètres à moins de 100 nanomètres.

Un matériau formé de nanoparticules de cuivre voit ainsi sa dureté augmenter approximativement selon le tableau suivant, qui compare la dureté du nouveau matériau à celle du matériau ordinaire :

Taille des nanoparticules	Rapport de dureté
50 nm	2
15 nm	3
6 nm	5

**Tableau 1**  
Comparaison des nanoparticules

Une autre propriété affectée par la taille des grains est la ductilité, caractéristique qui exprime la difficulté à briser le matériau sous un choc. En règle générale, plus un matériau est dur, moins il est ductile. Cette règle ne s'observe plus de la même manière chez les nanomatériaux qui peuvent présenter les deux avantages à la fois.

Une piste d'explication a été lancée mais n'est pas encore prouvée, la recherche étant encore dans ce domaine à l'étape de l'expérimentation. En réduisant la taille des particules, on agit directement sur les liens atomiques du matériau qui sont responsables de sa dureté. Pour ce qui est de la ductilité, certains chercheurs pensent que les nanoparticules, dû à leur taille réduite, glisseraient mieux entre elles lorsque le matériau subit un choc, ce qui aiderait à encaisser ce choc.

**Tableau 2**

Applications des nanomatériaux

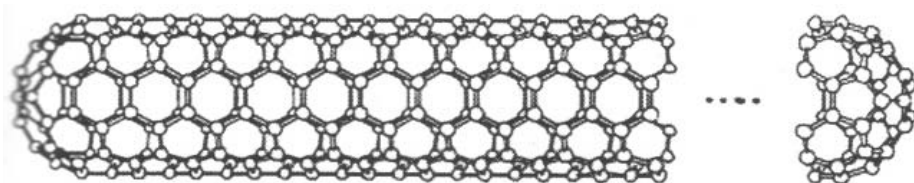
Technologies relatives à l'énergie	Industrie automobile	Optique	Senseurs hautement sensibles	Catalyseurs
Nouveaux types de cellules solaires du type Grätzell	Protection anticorrosion	Optique à gradation d'indice: des lentilles de plastique spécialisées	Senseurs pour différents gaz tels CO <sup>2</sup> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , CO, et CH <sub>4</sub>	Purificateurs d'air et d'eau photocatalytiques
Batteries rechargeables à haute densité d'énergie	Élimination des polluants des convertisseurs catalytiques	Plastiques résistant aux éraflures dans les lunettes, les lentilles, les viseurs	Senseurs à rayons UV et senseurs optiques robustes basés sur du siliciure de carbone nanostructuré	Meilleure activité, sélectivité et durée de vie dans la transformation chimique et les cellules à combustible
Fenêtres intelligentes employant l'effet photochrome ou l'orientation électrique	Automobiles hybrides employant des batteries qui utilisent des nanomatériaux	Revêtements anti-buée pour les fenêtres d'auto	Détecteurs de fumée	
Matériaux isolants plus efficaces	Fenêtres intelligentes	Verres teintés à faible coût	Détecteurs de glace sur les ailes d'avion	
Échangeurs de chaleur réparables en ligne dans des centrales nucléaires	Efficacité énergétique accrue grâce à des bougies d'allumage basées sur des nanomatériaux et revêtements résistant à la chaleur pour les cylindres	Filtres optiques		
Matériaux nanocristallins pour l'entreposage de l'hydrogène	Matériaux hybrides résistant aux éraflures			
Réfrigérateurs magnétiques basés sur des matériaux superparamagnétiques	Senseurs mesurant la performance du moteur			
Élimination des polluants dans les équipements de génération d'électricité				

### 1.2.1 Les nanotubes de carbone

Le carbone existe sous deux formes: le graphite et le diamant. La différence réside dans l'agencement des atomes de carbone. Pour le graphite, la disposition de l'ensemble des atomes se présente sous forme de feuillet, où chaque atome est lié à trois atomes voisins. Pour le diamant, le nombre de voisins liés monte à quatre, deux dans le plan au-dessus et deux dans le plan en dessous; d'où l'extrême résistance du diamant. En 1986, des chercheurs trouvent dans les suies formées par arc électrique entre électrodes carbone une nouvelle molécule, le C<sub>60</sub>. La différence avec la structure du graphite réside dans le fait que le feuillet qui ne comporte que 60 atomes se referme sur lui-même à la manière d'un ballon de soccer. En 1991, Sumio Iijima, de la société NEC au Japon, trouve par hasard, toujours dans les suies de la décharge de l'arc électrique, les fameux nanotubes de carbone. Cette fois-ci encore, le feuillet d'atome se referme sur lui-même, mais à la manière d'un long tube. Dans cette structure, chaque atome d'un bord est relié à un atome de l'autre bord. Le tube peut mesurer aussi peu que 1,5 nm de diamètre mais sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres.

Figure 8

Agencement des atomes de carbone dans un nanotube



Source: Jean-Louis Pautrat (2002), *Demain le nanomonde, voyage au cœur du minuscule*, Éditions Fayard, Le temps des sciences.

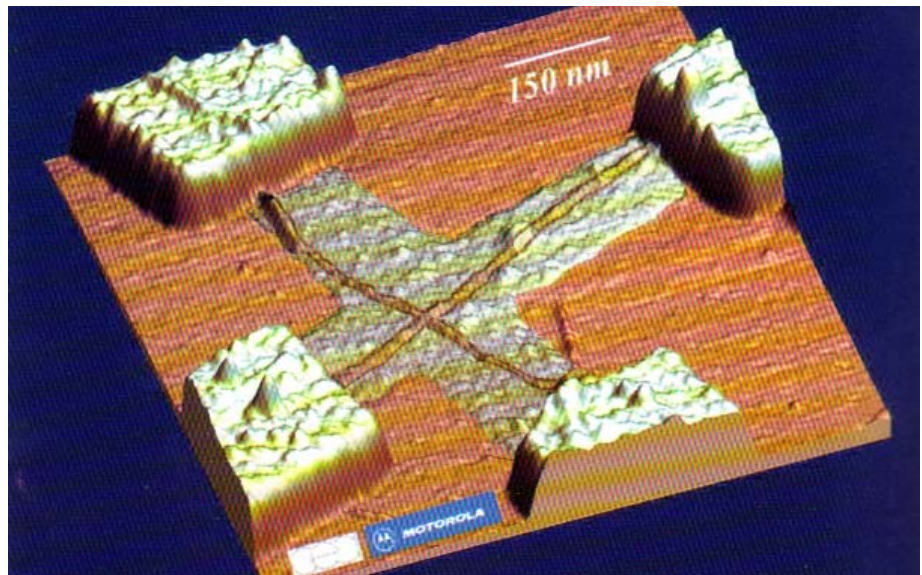
Les nanotubes sont soit métalliques, soit semi-conducteurs. Cela est déterminé par la chiralité, la manière avec laquelle le feuillet d'atomes de carbone se referme sur lui-même. Le nanotube métallique jouit d'une conductivité électrique hors pair, due au fait que le nanotube est un cristal parfait, sans impuretés ni défaut, et aussi sans effet de bord (le feuillet se refermant sur lui-même). Un résultat en laboratoire a montré que le nanotube de carbone peut transmettre jusqu'à 30 microampères, ce qui correspond à une densité électrique d'un milliard d'ampères par centimètre carré<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> C. Dekker, « Carbon nanotubes as molecular quantum wires », *Physics Today*, 1999, vol. 52, n° 5, p. 22-28.

Une autre force des nanotubes de carbone vient de leurs propriétés mécaniques améliorées: une résistance mécanique six fois supérieure à celle de fil d'acier. Cela est dû à la qualité de la structure atomique qui empêche toute propagation de défaut, source de déformation plastique. En soumettant le tube à un effort mécanique, il peut se plier mais retrouve sa forme initiale en l'absence de contrainte. Plusieurs applications profitant de ces propriétés ont déjà été mises au point. Notamment, des chercheurs ont pensé à se servir de nanotubes pour constituer le canal d'un transistor MOSFET. Le tube repose sur une plaque de silicium oxydé et relie la source et le drain.

### Figure 9

Nanotubes de carbone auto-assemblés sur une surface de silice fonctionnalisée



© E. Valentin, S. Auvray, LEM CEA-Motorola, Projet Saturn, IST 1999-10593

Les nanotubes de carbone fabriqués commercialement sont produits à partir d'hydrocarbures à faible poids moléculaire dans leur phase gazeuse au cours d'une réaction catalysée. Le diamètre extérieur du tube est approximativement de 10 à 15 nanomètres. Le diamètre intérieur est approximativement de 5 nanomètres. Les nanotubes sont en général longs de quelques dizaines de microns. Ils sont morphologiquement distincts des agrégats familiaux et nodulaires de charbon. Ils sont produits à partir de matières premières de pureté chimique élevée dans des conditions d'opération rigoureuses. Cela explique leur coût de production très élevé : 1500 \$/kg.

### 1.2.2 La nanopoudre de fer

Le problème de la dépollution représente souvent des sommes colossales. Une nanopoudre produite à partir de fer, un des métaux les plus abondants sur terre, s'avérait être un outil particulièrement efficace pour nettoyer le sol et les eaux souterraines souillées. Cette nouvelle est issue d'une publication, le 3 septembre 2003, dans le *Journal of Nanoparticle Research*, où l'ingénieur environnementaliste Wei-xian Zhang résume le fruit de huit ans de recherche en partie financée par le National Nanotechnology Initiative (NNI).

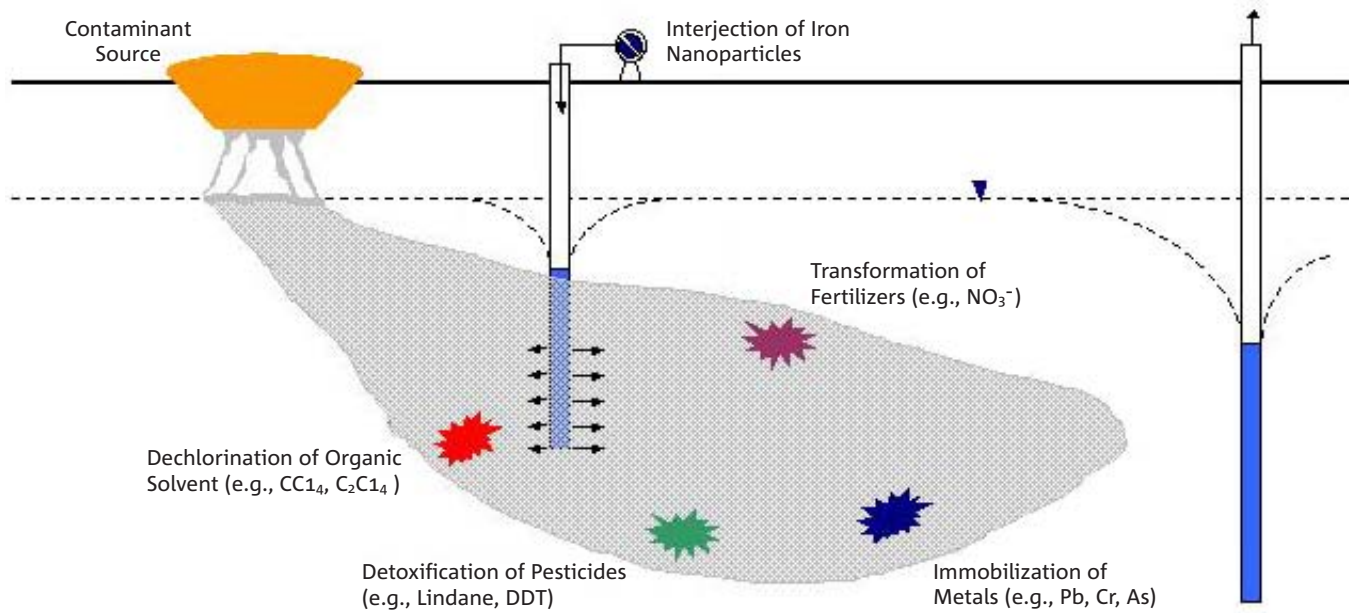
Le pouvoir nettoyant du fer provient de sa propriété d'oxydation. Selon les résultats des recherches de Zhang, quand le fer s'oxyde en présence de contaminants comme le trichloroéthène, les dioxines ou les PCBs, ces molécules organiques entrent en réaction et se brisent en simples composés carboniques beaucoup moins toxiques. Le même phénomène s'observe aussi pour les métaux lourds tels que le nickel, le mercure et l'uranium, que le fer en oxydation va réduire en une forme insoluble qui reste dans le sol plutôt que de parcourir la chaîne alimentaire. Plusieurs compagnies intègrent ainsi du fer à leurs déchets industriels. Malheureusement, ce procédé n'est pas très utile en ce qui concerne les polluants déjà présents dans le sol et l'eau. C'est là que les propriétés des nanoparticules de fer se démarquent. À cause de la taille extrêmement réduite de ces particules par rapport aux poudres conventionnelles, leur surface de contact collective est accrue et les propriétés catalytiques en sont améliorées (de l'ordre de 10 à 1000 fois). Ces poudres peuvent donc être intégrées directement au cœur de sites industriels contaminés. Une fois en place, elles pourront suivre le courant des eaux souterraines et opérer leur décontamination. Cette solution présente l'avantage d'être à la fois efficace et beaucoup moins coûteuse que celle qui consiste à enlever la terre pour la traiter. Autre avantage des nanopoudres: la petite taille des nanoparticules de fer (entre un et 100 nanomètres) leur permet de s'intégrer à la terre sans en être captives.

Les tests en laboratoire et sur le terrain ont confirmé que le traitement aux nanopoudres peut drastiquement réduire le niveau des contaminants dans les sites pollués, en un jour ou deux, voire les éliminer complètement en quelques semaines. Les tests montrent également que ces poudres restent actives dans la terre pour une période de six à huit semaines ou jusqu'à ce que les restes soient dissous dans l'eau souterraine; après quoi ce fer sera indissociable du fer naturellement présent dans le sol.

Finalement, la nanopoudre de carbone proposée par Zhang coûtait 500 \$ le kilogramme en 1995 au moment du début de l'étude, et coûte maintenant 40 à 50 \$ par kilogramme. Sachant que décontaminer 100 mètres carrés requiert 11,2 kg de fer, on peut prévoir un avenir prometteur aux nanopoudres sur le marché des décontaminants de sols pollués.



**Figure 10**  
Décontamination de fer par nanopoudre



© Lehigh University

### 1.2.3 La commercialisation

Le secteur des nanomatériaux a été le premier domaine des nanotechnologies à présenter des applications commerciales. Cela est dû au fait qu'il n'est pas nécessaire de comprendre tous les mécanismes physiques expliquant à l'échelle moléculaire les nouvelles propriétés découlant des nouveaux nanomatériaux avant de pouvoir les exploiter. En effet, les procédés d'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux consistant à intégrer de plus petits grains dans la matière existent déjà depuis longtemps.

Hyperion Catalysis, fondée en 1982, fut la première compagnie dans le domaine des nanotechnologies ([www.hyperioncatalysis.com](http://www.hyperioncatalysis.com)). Cette compagnie est le plus important fournisseur en nanotubes de carbone dans le monde et développe des produits essentiellement destinés au domaine de l'électronique et de l'automobile. L'utilisation des nanotubes aide à contrôler et absorber l'apparition d'électricité statique dans les circuits électroniques sensibles. En raison de leur petite taille et de la faible quantité requise au chargement, les nanotubes de carbone ont un effet minime sur les propriétés physiques des polymères auxquels ils sont incorporés. Les pièces produites à partir des produits basés sur les nanotubes de carbone ont des surfaces lisses et uniformes, les rendant idéales pour la peinture électrostatique en vaporisateur (améliorant de manière significative l'efficacité de transfert de peinture).



Nano-Tex ([www.nano-tex.com](http://www.nano-tex.com)) qui se spécialise dans l'étude des matériaux avec applications pour le domaine du textile a mis au point un tissu qui, après avoir subi un traitement chimique, est constitué de millions de fibres. Ce tissu améliore les propriétés des vêtements en les rendant plus imperméables, et plus résistants aux taches et aux plis.

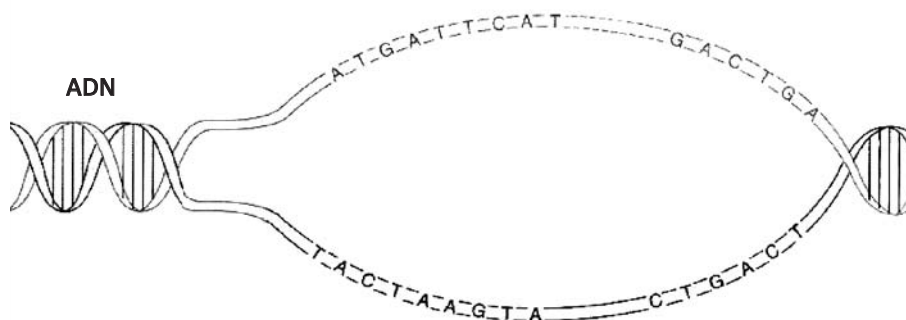
### 1.3 Les nanobiotechnologies

Les nanotechnologies sont porteuses de beaucoup d'espoir pour le domaine de la santé, car elles permettront d'aller au cœur du vivant et de repousser les limites de la médecine traditionnelle.

#### 1.3.1 La biopuce

##### Notions prérequis

L'ADN, qui est la carte d'identité unique et infalsifiable de chaque être vivant, fait l'objet de recherches scientifiques depuis une cinquantaine d'années. L'acide désoxyribonucléique renferme toute l'information servant à expliquer ce complexe mécanisme qu'est notre organisme. En trouvant les clés qui servent à déchiffrer ce code, il sera possible d'expliquer les liens entre les plus simples éléments constituant le vivant (les cellules) et le fonctionnement (ou le dysfonctionnement) de notre système. L'ADN est un ruban long de deux mètres enroulé en hélice et qui pèse aussi peu que 7,3 picogrammes (un picogramme égale 10<sup>-12</sup> g, soit un millionième de millionième de gramme). Cette hélice est en fait un assemblage de deux brins constitués de molécules de sucre et de phosphate. Ces deux brins sont reliés ensemble par des ponts qui sont un assemblage des quatre bases, réunies par paires. Les bases sont représentées par les lettres A (adénine), T (thymine), G (guanine) et C (cytosine). Il n'y a qu'une façon de réaliser les paires: A avec T et G avec C, mais c'est dans la succession de ces paires le long des deux brins d'ADN qu'est renfermée l'information utile du génome.



**Figure 11**  
Représentation de l'ADN

### Le but premier

Le génome humain compte environ trois milliards de paires formant une banque de 30 000 gènes. Le nombre de gènes est beaucoup moins révélateur de la complexité de l'organisme, la preuve en est qu'une simple levure n'a pas beaucoup à envier à l'humain en termes de nombre de gènes. La différence vient de l'assemblage de ces gènes. Malgré cela, deux individus auront à peine 0,3 % de différence dans leur génome. Cette faible différence d'assemblage est la clef qui permet d'expliquer nos particularités par rapport à nos capacités physiques et intellectuelles, notre plus ou moins grande sensibilité aux maladies, etc. Expliquer le lien entre les différences au point de vue moléculaire et les différences tangibles au niveau du système pour attribuer des fonctions précises à chaque gène ou groupe de gènes, est le but premier de la recherche dans le domaine. Ensuite, il s'agira de prédire les effets des mutations génétiques sur le fonctionnement du système, cela dans le but ultime de corriger les dysfonctionnements du corps humain ou encore d'améliorer ses capacités.

L'ADN a une propriété qui va être très utile pour atteindre ces buts : la spécificité d'hybridation. Les deux brins d'ADN se séparent au-delà d'une température seuil d'environ 60 °C. Une fois la température revenue à la normale et les deux brins séparés remis en contact dans une solution appropriée, les brins complémentaires vont se réassembler, en respectant toujours la spécificité qui lie la base A à la base T et la base C à la base G uniquement. De cette manière, un brin de séquence ATGA ne pourra s'associer qu'avec le brin de séquence complémentaire TACT.

Ainsi, pour identifier le contenu génétique d'une solution donnée, il suffirait de séparer les brins d'ADN la constituant et de les mettre en présence d'une solution contenant une grande banque de séquences. Une fois les différentes associations possibles faites, il s'agirait de trouver un moyen de les identifier de façon à en déduire la séquence ADN de la solution à analyser au départ. C'est l'idée à la base de la création des BIOPUCES.

Les biopuces sont en fait un support servant à constituer la banque de séquences d'ADN, les séquences sondes. Ce support sera sous forme de plaque de verre ou de silicium d'un cm<sup>2</sup>, sur lequel il faudra être capable de déposer les séquences désirées dans des compartiments précis et dans un ordre précis. Ensuite, il faudra trouver le moyen d'identifier les endroits où l'hybridation aura été effective.

## Techniques de synthèse

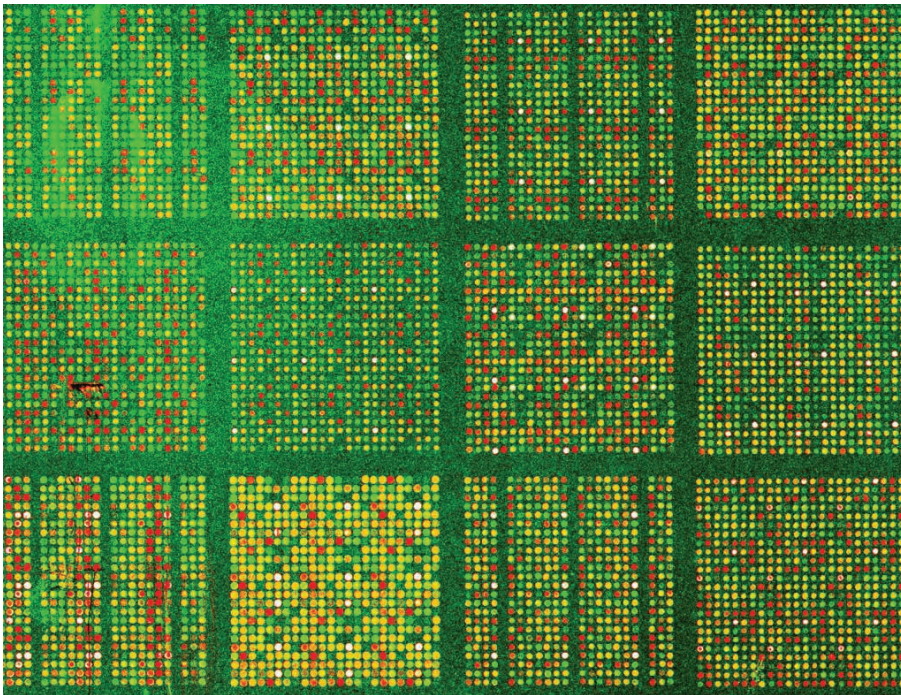
Présentement, il existe essentiellement trois techniques de synthèse permettant de déposer les séquences sondes sur la biopuce. La première, la synthèse *in situ*, se sert des techniques de photolithographie empruntées à la micro-électronique. La deuxième technique, la synthèse *ex situ*, utilise une matrice d'électrodes. La dernière technique utilise la technologie des têtes d'imprimantes.

## Assemblage

Une fois les brins d'ADN assemblés avec leur brin complémentaire, il faut trouver le moyen de se rendre compte que le point numéro X contient un double brin et ne pas confondre cette case avec sa voisine. Cela demande une méthode très sensible et peu susceptible d'erreurs de calcul. On utilise alors le marquage fluorescent. Sur la figure suivante, on peut observer l'ensemble des gènes exprimés par une cellule de levure. La fluorescence des points indique le degré d'expression de chaque gène.

**Figure 12**

Ensemble des gènes exprimés par une cellule de levure et révélés par une biopuce



### Applications médicales

Une bonne partie des maladies auxquelles nous faisons face sont directement reliées à notre patrimoine génétique. La tâche d'associer un gène spécifique à une maladie donnée est plutôt ardue. En effet, ce n'est pas un seul gène qui est à la source de l'apparition d'un cancer donné mais plutôt un groupe de gènes. En associant précisément le bon groupe de gènes au type de cancer dont souffre le malade, on sera plus en mesure de le combattre efficacement en utilisant une thérapie mieux adaptée.

Par exemple, une étude récente sur le cancer du sein s'est intéressée au niveau d'expression de 25 000 gènes dans les tumeurs<sup>2</sup>. Les résultats montrent que l'apparition de métastases est contrôlée par 231 gènes, parmi lesquels seuls 70 gènes ont un niveau d'expression absolument déterminant. Après une première phase de validation de ces résultats sur un vaste échantillon de patientes, les biopuces pourraient servir à diagnostiquer génétiquement les sujets malades et ainsi éviter de lourds traitements après opération dans le cas où l'apparition de métastases est peu probable.

En bref, la biopuce devient un outil de diagnostic essentiel pour tracer un profil précis de la maladie cancéreuse, même si la mutation génétique à détecter concerne aussi peu que un pourcent des cellules de la tumeur (comme dans le cas de la mutation du gène P53 qui accélère la reproduction des cellules tumorales de la vessie et de la peau). Les techniques classiques de séquençage sont longues et coûteuses : il faut faire un prélèvement, l'observer au microscope, faire sa mise en culture et l'identification des agents pathogènes, ce qui peut prendre dans certains cas trois à quatre semaines, période pendant laquelle le traitement est retardé. La biopuce ADN apporte une solution rapide et plus économique. D'autant plus que, dans l'avenir, on projette d'utiliser de plus en plus de biopuces dites « à haute densité », capables d'analyser le niveau d'expression de centaines et de milliers de gènes. Grâce à ces puces portant jusqu'à 400 000 localisations, la science se dote d'un outil de plus pour répondre à l'épineuse question de la relation gènes-maladie. La société BioMérieux collabore avec les différents fabricants de biopuces (dont le leader Affymetrics) pour utiliser les biopuces à haute densité dans divers cas de maladies pathologiques (infection respiratoire, infection génitale) afin de trouver rapidement l'agent pathogène responsable et d'étudier sa résistance aux différents traitements. Le délai pour ces opérations peut être réduit à quatre ou cinq heures à l'aide des biopuces à haute densité. Une biopuce a déjà été mise au point pour identifier la souche de l'agent pathogène de la tuberculose et évaluer la résistance aux antibiotiques que certaines mutations génétiques apportent.

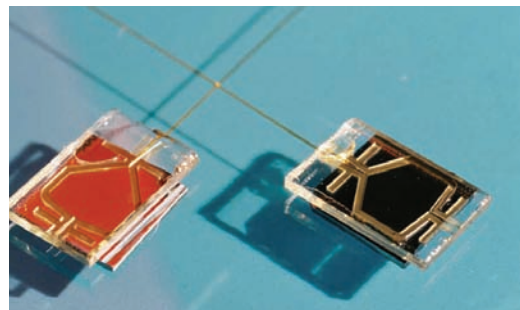
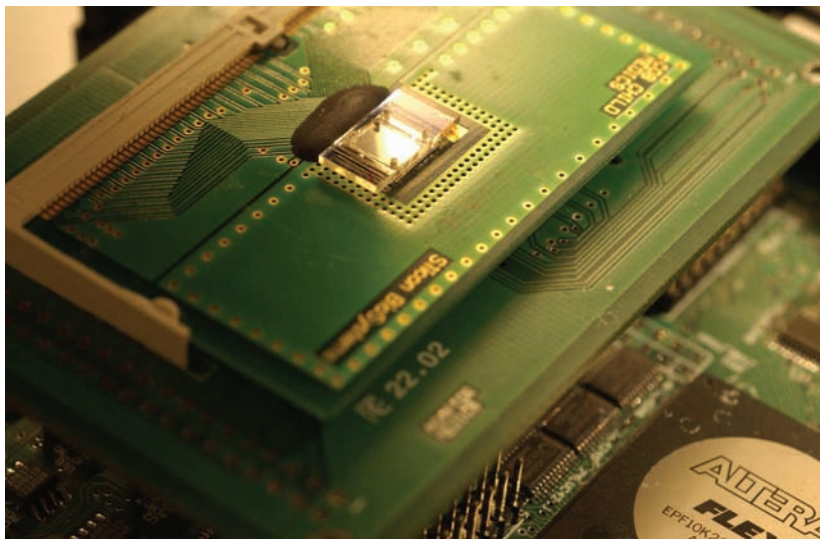
---

<sup>2</sup> L. Blottière, « Cancer du sein : des puces à la rescousse », *La Recherche*, mai 2002, n° 353, p. 14-15.



**Figure 13**

Biopuces - Projet MeDICS - Contrôle du micro dispositif de tri cellulaire



Grâce au dispositif MeDICS, faire léviter dans toutes les directions, mesurer et analyser une cellule unique (de quelques dizaines de microns) est devenu un jeu d'enfant. Grâce à des champs électriques créés par un réseau de microélectrodes, les cellules se trouvent piégées, sans contact mécanique, au sein d'une cage potentielle (dite diélectrophorétique). En manipulant chaque cellule indépendamment, il devient possible de trier des populations de cellules rares, par exemple, lors de l'analyse de biopsies ou de l'isolement de cellules souches à visée thérapeutique.

© P. Stroppa/CEA

### Autres applications

Les biopuces trouvent également leur application dans le domaine environnemental, dans les cas où l'on désire surveiller le niveau de contamination par des micro-organismes. Les agents contrôlant la qualité de l'eau, des produits alimentaires ou des cosmétiques pourraient utiliser des biopuces pour détecter les pollutions organiques ou microbiennes. La rapidité d'action et la portabilité des biopuces devraient permettre aux inspecteurs d'obtenir des résultats directement sur le terrain, plus rapidement et avec plus de précision (un rapport de sensibilité de 1000 est attendu par rapport aux méthodes conventionnelles).

### 1.3.2 Les associations neurones-transistors

En vue de contrôler le vivant et l'inerte dans leurs plus petites dimensions, un nouveau défi scientifique aux allures de chimère est passé au domaine du réalisable: le mariage du silicium et du vivant a été réalisé par l'équipe du chercheur allemand Peter Fromherz.

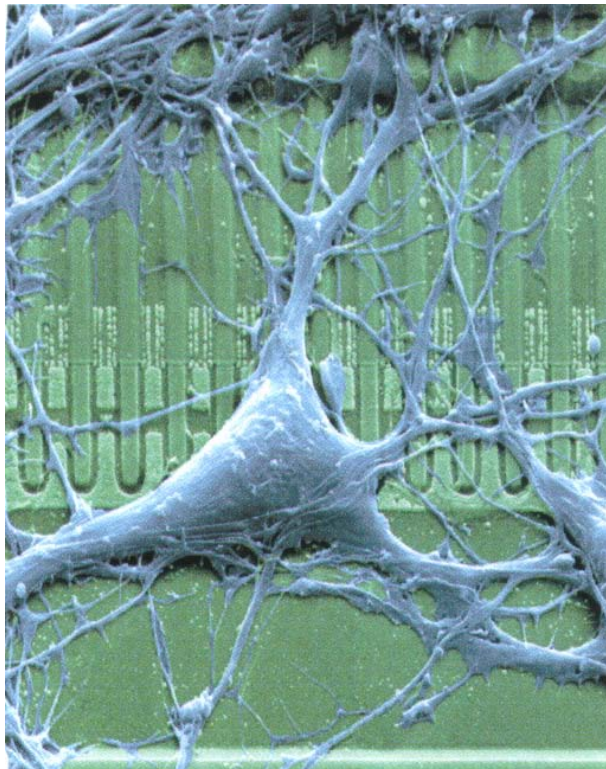
Le principe de base est simple : une variation de potentiel à la grille d'un transistor MOSFET se transforme en courant et toute cellule neuronale a une certaine activité électrique. Il s'agit donc de transférer le contrôle électrique à la cellule et ce, sans intermédiaire. Plusieurs difficultés sont à surmonter avant la réussite

d'un tel objectif: il faut tout d'abord préparer des transistors nus, désinfecter le circuit (par irradiation de lumière UV), déposer à la surface une protéine d'adhésion pour la cellule, traverser la paroi cellulaire qui constitue une barrière difficile à franchir.

Une première étape a été franchie en induisant un effet cellulaire identifiable grâce à un courant alternatif à fréquence suffisamment élevée<sup>3</sup>. L'étape suivante a été de faire pousser un réseau de neurones sur une puce en communiquant avec elle à travers les synapses. Des cellules neuronales d'escargot ont été mises en contact avec les transistors d'une puce électronique, ensuite elles ont été maintenues en place et plongées dans un milieu nutritif. Deux ou trois jours plus tard, ces neurones se développent et établissent des contacts avec la puce. Une micropipette a détecté une stimulation électrique dans le corps cellulaire d'un neurone, stimulation répercutée dans le transistor relié par le biais de la synapse naturelle<sup>4</sup>.

**Figure 14**

Neurone d'un cerveau de rat déposé sur un ensemble de transistor



© Fromherz/MPI Biochemistry

<sup>3</sup> D. Braun et P. Fromherz (2001). « Fast voltage transients in capacitive silicon-to-cell stimulation », *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, p. 2905.

<sup>4</sup> G. Zeck et P. Fromherz (2001). « Noninvasive neuroelectronic interfacing with synaptically connected snail neurons immobilized on a semiconductor chip », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, p. 10457.

### 1.3.3 La commercialisation

Dans le domaine des nanobiotechnologies, les premiers produits commerciaux visent principalement à fournir des microlaboratoires d'analyse d'ADN. Pour être capable d'intégrer toutes les opérations d'analyse d'ADN au sein d'un micro-labo sur puce, il faut être en mesure d'analyser des microvolumes de solution. Il est possible d'analyser seulement un microlitre de solution contenant moins de 50 nanogrammes d'ADN. C'est la capacité qu'offre le bioanalyser 2100 commercialisé par Agilent Technologies. Ce système offre la possibilité d'effectuer une analyse rapide, précise et automatique d'échantillons d'ADN ou de protéines. Il ne permet pas pour autant de faire du séquençage, la précision de la sélection en masse étant limitée à trois paires de bases. L'avantage principal d'un tel système est d'évaluer la qualité des produits à analyser en limitant les opérations manuelles.

**Figure 15**  
Bioanalyser 2100 d'Agilent Technologies



© Agilent Technologies

# Données économiques et politiques nationales

## 2.1 Investissements

Le potentiel des nanotechnologies a rapidement amené les gouvernements des pays les plus industrialisés à investir d'importants montants dans la R&D. À l'heure actuelle, on compte environ une cinquantaine de pays qui se sont déjà dotés d'une stratégie nationale de financement de la R&D dans le domaine des nanotechnologies.

- En Asie, les pays les plus actifs sont le Japon, la Chine, la Corée du Sud, Taiwan et Singapour.
- En Europe, en plus des pays de l'Union européenne, dont surtout la France (à Grenoble), la Suisse est très active. La Russie et l'Ukraine entretiennent des activités de recherche dans le domaine, particulièrement dans la synthèse de nouveaux matériaux. De nouveaux plans nationaux voient le jour en Europe de l'Est. L'Union européenne a aussi reconnu l'importance grandissante des nanotechnologies et a alloué environ deux milliards de dollars CAN dans le domaine, sous le programme FP6 (Sixth Framework Programme) pour la période de 2002 à 2006.
- Au Canada, le Conseil national de recherche a créé l'Institut national de nanotechnologie, doté d'un budget de 120 millions de dollars CAN sur cinq ans.
- Le Japon s'est récemment doté d'un budget de quelque 75 milliards de yens (autour de 887 millions de dollars CAN) pour l'exercice budgétaire 2002.
- Aux États-Unis, le budget fédéral pour l'année 2002 accordait 604 millions de dollars US pour la R&D. La Californie à elle seule injecte dans le domaine plus de 100 millions de dollars par année.



Les montants réels sont toutefois difficiles à évaluer, étant donné la nature multidisciplinaire des nanotechnologies. Quand un gouvernement annonce qu'il injecte un certain montant dans ce domaine, il se trouve indirectement à le faire aussi pour certains secteurs technologiques sous-jacents.

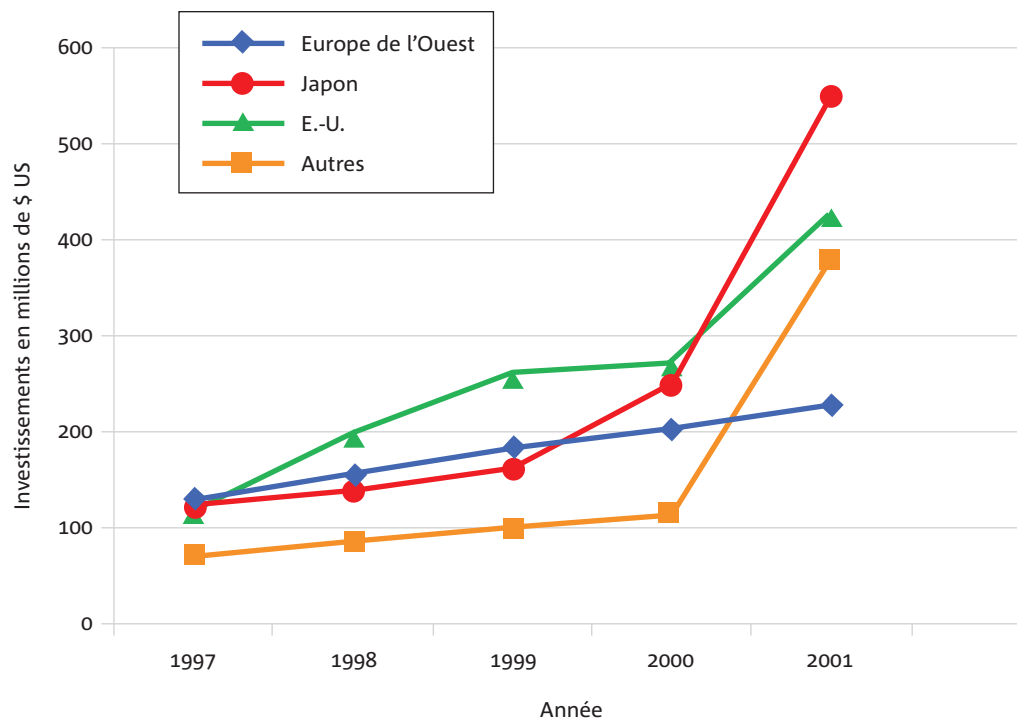
Le tableau suivant présente les estimations des investissements gouvernementaux, en millions de dollars, de 1997 à 2001. « Europe de l'Ouest » désigne les pays de l'Union européenne en plus de la Suisse; « Autres » représente l'Australie, le Canada, la Chine, l'Union soviétique, la Corée, Singapour, Taiwan et d'autres pays ayant des activités de R&D en nanotechnologie. Les années financières commencent en octobre aux États-Unis (note *a*) et en mars ou avril dans la plupart des autres pays (note *b*).

**Tableau 3**  
Estimation des investissements gouvernementaux de 1997 à 2001  
(en millions de dollars US)

Région	Période									
	1997		1998		1999		2000		2001	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Europe de l'Ouest	126		151		179		200		225	
Japon	120		135		157		245		550	
États-Unis	116		190		255		270		422	
Autres	70		83		96		110		380	
<b>Total</b>	<b>432</b>		<b>559</b>		<b>687</b>		<b>825</b>		<b>1577</b>	

**Figure 16**

Investissements nationaux en R&amp;D pour la nanotechnologie (août 2001)



Source: *Les nanotechnologies, la maîtrise de l'infiniment petit*, avis publié par le Conseil de la Science et de la Technologie 2001.

## 2.2 La politique du Canada

Bien qu'il reconnaisse de plus en plus l'importance de la place que doivent prendre les nanotechnologies dans les préoccupations d'ordre scientifique et qu'il y ait une bonne connaissance scientifique sur le terrain, le Canada n'est pas encore reconnu à l'échelle mondiale comme un acteur important dans le domaine. Cela s'explique par le fait qu'il n'existe pas encore de plan de développement d'ensemble dans le but de coordonner tous les efforts nationaux, dans les universités, les entreprises privées, les capitaux à risques et les fonds publics.

Au Canada, le seul plan de développement notable dans le domaine des nanotechnologies supporté par un effort gouvernemental est celui de l'Institut national de nanotechnologie.

Le centre de recherche de l'Institut s'intéresse aux sujets suivants : structures micromagnétiques, dispositifs micro-optiques, dispositifs pour processus optiques ultrarapides, composants micro-usinés, structures de couches minces uniques, modèles de croissance de couches minces. Également, l'Université de l'Alberta possède un centre de recherche en génie électrique et informatique axé sur les nanotechnologies.

Parmi les grandes entreprises albertaines qui supportent la R&D en nanotechnologie se trouvent :

- Petro-Canada
- SciMed Laboratories
- Celonex
- BigBangWidth
- Westaim Biomedical
- BioTools Incorporated

Le gouvernement albertain a ajouté 60 millions de dollars à l'investissement de base de 60 millions de dollars venant du Conseil national de recherches Canada et a également construit d'importantes installations pour les technologies biopharmaceutiques.

Notons toutefois quelques éléments qui font que le Canada est encore en retard sur certains pays modèles en matière de nanotechnologies : un nombre limité d'entreprises privées œuvrant dans le domaine, et l'absence de société d'investissement en capital de risque.

## 2.3 La politique du Québec

### 2.3.1 VRQ - NanoQuébec

En avril 1999, le ministre de la Recherche, de la Science et de la Technologie rendait public le plan d'action du gouvernement du Québec en matière de recherche scientifique. Dans ce rapport, le gouvernement s'engage à faire de la recherche au Québec un outil de progrès économique. Pour ce faire, on a créé Valorisation Recherche Québec (VRQ), dont la mission est de contribuer à renforcer la recherche universitaire et à en accroître les retombées pour la société québécoise.

VRQ apporte un soutien financier au milieu de la recherche universitaire québécoise. Au financement initial de 100 millions de dollars sur 6 ans (1999-2006), le gouvernement du Québec a ajouté un deuxième fonds de 120 millions de dollars sur quatre ans (2000-2004).

C'est ainsi qu'a été lancé NanoQuébec, le réseau universitaire québécois en nanosciences et nanotechnologies. Ce réseau a été créé dans le but de se doter d'un programme concerté de recherche dans ce domaine en émergence. NanoQuébec est composé de l'Université de Montréal, l'Université McGill, l'Université de Sherbrooke, l'École Polytechnique de Montréal, l'INRS-énergie et matériaux et l'Université Laval. Sa mission est d'amener le Québec au rang des chefs de file mondiaux de la recherche et de la valorisation des nanosciences et nanotechnologies. Les fonds attribués au réseau NanoQuébec par VRQ serviront principalement à financer les trois volets d'activités suivants :

- le fonctionnement des installations centrales en tant que centres régionaux,
- le financement complémentaire de projets de recherche interdisciplinaires associés aux thématiques principales du réseau,
- la promotion de la collaboration et des interactions entre les chercheurs du réseau.

Le réseau de NanoQuébec cible des domaines thématiques centrés sur les nouveaux phénomènes physiques et chimiques reliés aux dimensions nanométriques des matériaux, des propriétés électroniques, mécaniques et structurales aux applications biotechnologiques et pharmacologiques des nanosciences. Deux grandes orientations stratégiques soutiennent l'ensemble des activités du réseau :

- Le développement des approches et des méthodologies essentielles au domaine des nanomatériaux structurés: assemblage des nanomatériaux, développement de nouvelles méthodologies de fabrication et de caractérisation, modélisation et simulation des propriétés physiques et chimiques.
- L'approfondissement des connaissances et l'élargissement de l'expertise dans les domaines thématiques retenus: nanomatériaux, nanosystèmes, nanoélectronique et nanophotonique, applications des nanosciences aux sciences biotechnologiques et pharmaceutiques, auto-assemblage et patterning.

(Voir tableau 4)

**Tableau 4**

Projets en cours dans le réseau NanoQuébec

Projets en nanomatériaux	Projets en nanoélectronique nanophotonique	Projets en nanobiotechnologie nanopharmaceutique	Projet en auto-assemblage patterning
<p>Étude de l'influence du caractère nanostructuré d'un matériau sur ses propriétés électrocatalytiques: application à l'électroréduction sélective des nitrates et nitrites en azote. <i>Responsable: Bélanger, Daniel</i></p>	<p>Contrôle spatial sub-100 nm des propriétés optiques d'hétérostructures semi-conductrices par interdiffusion de puits quantiques. <i>Responsable: Aimez, Vincent</i></p>	<p>Influence of Composition and Processing Parameters on Size, Stability and Efficiency of Chitosan-based Nanoparticles for Gene Delivery. <i>Responsable: Buschmann, Michael</i></p>	<p>Patterning Surfaces on a Nanometric Scale by Molecular Self-Assembly. <i>Responsable: Sleiman, Hanadi</i></p>
<p>Développement de matériaux poreux nanostructurés utilisés comme agents de rétention d'encre. <i>Responsable: Boisvert, Jean-Philippe</i></p>	<p>Investigation of Self-Assembled Molecular Field Effect Transistor. <i>Responsable: Grutter, Peter</i></p>	<p>Novel Non-viral Polymeric Nanoparticles for Gene Therapy and Tissue Engineering. <i>Responsable: Fernandes, Julio</i></p>	
<p>Functional Nanopowder Synthesis for Nanograin Boundary Engineered Materials. <i>Responsable: Gitzhofer, François</i></p>	<p>Tunable Photonic Bandgap Devices Based On Omnidirectional Multilayer Structures for Next-Generation Agile All-Photonic Networks. <i>Responsable: Kirk, Andrew</i></p>	<p>Gold Nanoparticles and Biological Matrices. <i>Responsable: Lennox, R. Bruce</i></p>	
<p>Nanoagrégats obtenus par implantation ionique. <i>Responsable: Schiettekatte, Francois</i></p>	<p>PLD-Grown Ferroelectric Oxide Nanometric Patterning using Ultrathin Twist Bonded Silicon Substrates. <i>Responsable: Pignolet, Alain</i></p>	<p>Towards Single Molecule Detection Devices Using Peptide Nanostructures As Molecular Transduction Systems. <i>Responsable: Voyer, Normand</i></p>	
<p>Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes for Applications in Nanotechnology. <i>Responsable: Stansfield, Barry</i></p>	<p>Metal Nanoparticles for Photonic Applications. <i>Responsable: Ritcey, Anna</i></p>	<p>Controlled Surface Nanopatterning in Tissue Engineering for Bone and Cartilage. <i>Responsable: Wertheimer, Michael R.</i></p>	
<p>Imaging with Coherent X-rays. <i>Responsable: Sutton, Mark</i></p>	<p>A Molecular Electronics Test Platform for the Development of an Integrated Hybrid CMOS/ Molecular Electronics Technology. <i>Responsable: Savaria, Yvon</i></p>		

En février 2003, Samson Bélair Deloitte et Touche, en collaboration avec NanoQuébec, a présenté un rapport faisant le portrait des activités de nanotechnologie au Québec. Dans ce rapport, on répertorie vingt-cinq petites entreprises ou entreprises en démarrage opérant dans le domaine des nanotechnologies. En moyenne, ces entreprises entretiennent deux projets de recherche avec dix chercheurs et trois applications dans l'entreprise. Ces entreprises ont identifié certains secteurs de recherche comme prioritaires, compte tenu des faits suivants:

- La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique sont très bien implantées au Québec en raison de l'étroite collaboration entre les universités et les entreprises.
- Aligner les priorités sur les centres d'excellence déjà établis permet un développement concurrentiel.
- Les ressources naturelles présentes en abondance au Québec (aluminium, magnésium) sont un avantage pour qui se lance dans la conception de nanomatériaux.
- Les installations que requièrent les activités de recherche en électronique pure (microprocesseurs, lithographie) ne sont pas présentes au Québec, et le gouvernement ne peut garantir de tels investissements.

En conséquence, les secteurs de recherche prioritaire identifiés sont les suivants:

- Biotechnologie et applications pharmaceutiques
- Applications aéronautiques et métallurgiques (aluminium)
- Photonique dans le secteur électronique
- Optique et microélectronique pour les télécommunications
- Nanomatériaux pour le stockage de l'hydrogène, les catalyseurs et les électrodes nanostructurés

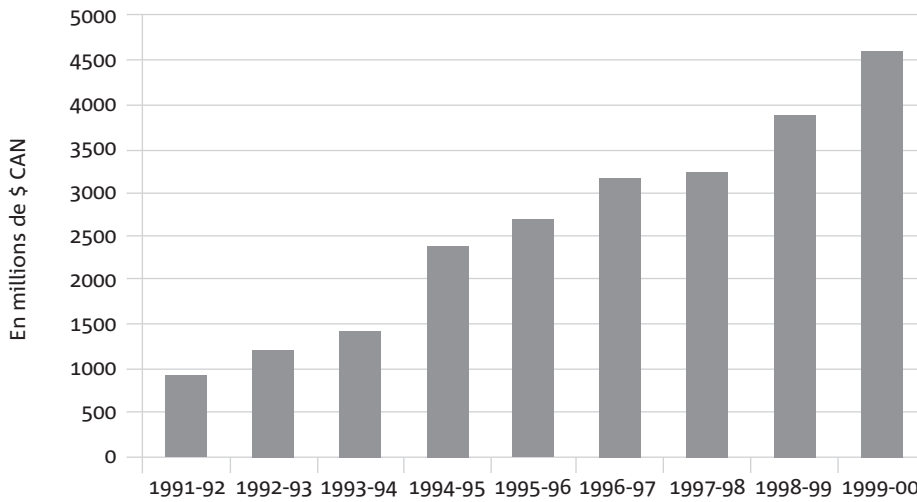
En date du rapport, 172 chercheurs ont été identifiés au Québec, dans neuf centres universitaires (McGill, Concordia, Université de Montréal, Polytechnique, UQAM, UQTR, Sherbrooke, Laval et INRS). Sur les 172 chercheurs, 73 sont actifs en nanotechnologie dans la majeure partie de leurs activités. Pour ce qui est des sources de financement, 51 % des fonds proviennent d'organismes fédéraux, 37 % d'organismes québécois, 11 % du secteur privé et 1 % d'organismes internationaux.

Parmi les vingt entreprises actives au Québec ayant de grands centres de recherche, seules Hydro-Québec et Alcan mènent des activités de recherche en nanotechnologie.

### 2.3.2 Le CRSNG

Une autre source de financement est le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie. Le CRSNG appuie financièrement chaque année plus de 17700 étudiants universitaires et stagiaires postdoctoraux, ainsi que plus de 9600 professeurs d'université. De plus, le Conseil favorise l'innovation en incitant plus de 500 entreprises canadiennes à investir dans la recherche universitaire. En 2003-2004, le CRSNG investira 760 millions de dollars dans la recherche et la formation universitaire dans toutes les disciplines des sciences naturelles et du génie.

Dans le rapport présenté par le Conseil de la science et de la technologie sur les nanotechnologies<sup>5</sup>, on retrouve le graphique suivant indiquant les montants (en milliers de dollars) des subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies.



**Figure 17**  
Subventions et bourses

<sup>5</sup> *Les nanotechnologies, la maîtrise de l'infiniment petit*, Conseil de la science et de la technologie, 2001.

Dans le but de soutenir l'effort canadien en matière de nanotechnologie, le CRSNG s'est doté d'une plate-forme d'innovation en nanoscience et nanotechnologie, dont la mission est de coordonner la recherche universitaire canadienne menée dans ces deux domaines. Pour accomplir cette mission, la NanoPIC fera appel à la collaboration d'organisations telles que NanoQuébec et l'Institut national de nanotechnologie (INT) à Edmonton.

Les objectifs visés sont les suivants:

- Élaborer une vision stratégique pour la nanotechnologie au Canada reposant sur les intervenants du domaine.
- S'assurer que l'évaluation par les pairs, ainsi que la sélection et l'attribution des subventions de la NanoPIC, se font à l'échelle internationale. Au départ, ces subventions viseront à appuyer quelques projets à haut risque à un niveau élevé de financement.
- Organiser des ateliers dans les localités partout au pays en vue d'aider à établir des groupes de recherche locaux.

En juin 2002, M. Peter Grütter, professeur au département de physique de l'Université McGill, a été nommé au poste de directeur de la recherche de la plate-forme d'innovation du CRSNG en nanoscience et en nanotechnologie. Depuis 1986, M. Grütter travaille activement dans les domaines de la microscopie électronique par balayage et de la nanoscience.

Parmi les vingt entreprises actives au Québec ayant de grands centres de recherche, seules Hydro-Québec et Alcan mènent des activités de recherche en nanotechnologie.



## L'évaluation des risques

Il n'existe à ce jour aucune étude concluante sur l'évaluation des dangers qui pourraient être directement reliés aux nanotechnologies. L'état d'avancement des nanosciences et des nanotechnologies ne permet pas encore de connaître et de bien évaluer ces risques. La tendance est de les minimiser, en rapport à la vaste étendue des applications possibles et envisagées. Il n'en demeure pas moins que ce problème est de plus en plus soulevé dans la communauté scientifique.

En juin 2003, le gouvernement anglais a donné à la Royal Society et à la Royal Academy of Engineering le mandat de mener une étude indépendante sur la question de savoir si les nanotechnologies soulèvent ou sont susceptibles de soulever des problèmes d'éthique, de santé, de sécurité et de société qui ne sont pas soumis à une réglementation déjà existante.

Le but de cette étude a été de :

- définir ce que signifient les termes « nanoscience » et « nanotechnologie » et faire une description de l'état actuel des connaissances dans le domaine ;
- identifier les applications spécifiques de ces nouvelles technologies, en particulier là où la nanotechnologie est déjà en application, déterminer comment elle pourrait l'être dans l'avenir et faire l'évaluation la plus probable du temps que cela prendrait ;
- évaluer les impacts potentiels sur la santé, la sécurité et l'environnement que les applications en nanotechnologies pourraient avoir (incluant l'incertitude reliée à cette évaluation) ;
- faire ressortir les questions éthiques et sociales entourant le développement de cette technologie ;
- identifier les secteurs où une réglementation doit être considérée.

L'état d'avancement des nanosciences et des nanotechnologies ne permet pas encore de connaître et de bien évaluer ces risques. La tendance est de les minimiser...

### 3.1 L'environnement

Comme cela a été expliqué dans les sections précédentes, les nanomatériaux vont remplacer ceux qu'on utilise actuellement, à cause de leurs propriétés mécaniques améliorées. Par exemple, dans le domaine de l'automobile, le fait d'avoir recours à des matériaux faits de composites polymériques pourrait se traduire par une utilisation accrue de pièces structurelles en plastique qu'on assemblerait pour former des parties importantes du véhicule. Cela réduira le poids de la carrosserie, donc la consommation d'énergie et la pollution qui en résulte. Par contre, le recyclage des polymères étant plus ardu que celui du métal, il faudra alors se doter de nouvelles méthodes de recyclage des nanomatériaux.

### 3.2 L'entreposage

En raison de l'augmentation de la surface des particules, ce qui entraîne une plus grande réactivité, l'entreposage des nanoparticules exige des soins particuliers (comme on l'a vu précédemment). Elles peuvent s'oxyder facilement. De plus, elles cherchent souvent à s'agglomérer entre elles. Il faut donc les entreposer soit dans un gaz inerte, soit en les enrobant d'une couche protectrice constituée de polymères ou de sels. Si l'on choisit des sels, il faudra en plus les enlever avant l'utilisation des particules. Par ailleurs, la taille des nanoparticules peut varier en cours de production, parfois de plusieurs nanomètres, de sorte qu'il faudra procéder à des transformations supplémentaires pour obtenir des nanoparticules de taille similaire. Leur production demeure alors encore complexe et souvent coûteuse.

### 3.3 Les risques pour la santé

Les risques pour la santé reliés aux nanotechnologies ont été le sujet de quelques études qui jusqu'à maintenant n'ont pas abouti à des résultats concluants mais n'éliminent pas la possibilité de dangers reliés aux nanomatériaux. En voici quelques exemples.

Citons d'abord l'étude sur les nanomatériaux menée par **Vicki L. Colvin**, directrice du Centre de nanotechnologie environnementale et biologique de l'université Rice. Colvin et son groupe de nanochimistes qui fabriquent de

nouvelles nanoparticules collaborent actuellement avec des toxicologues, des biologistes et des ingénieurs biomédicaux pour évaluer les effets biologiques imprévus de ces nanomatériaux. Selon Colvin, la difficulté de l'étude vient du fait que la grande diversité des nanomatériaux implique qu'il n'y aura pas de réponse unique à la question d'évaluation des risques. À l'heure actuelle, selon elle, il est encore trop tôt pour affirmer ou infirmer que les nanoparticules sont dangereuses pour la santé ou l'environnement. La réponse se situe probablement entre les deux positions. Le plus tôt on aura des données techniques fiables, le plus tôt on pourra réglementer et réguler les risques.

On a constaté la tendance des nanoparticules de moins de 50 nm à infiltrer les cellules. La question est alors de savoir où se dirigent ces nanoparticules et comment elles sont distribuées dans le corps. Apparemment, les particules de taille plus réduite circulent dans le corps de façon plus prolongée et peuvent dans certains cas franchir la barrière hémato-méningée, sortir des vaisseaux sanguins et se retrouver dans les fluides intercellulaires. Les nanoparticules peuvent donc se rendre jusqu'aux parties du corps qu'aucune matière inorganique n'avait réussi à atteindre jusqu'à maintenant.

Un problème qu'entrevoit Colvin est l'état d'avancement de la nanoscience, par rapport aux pressions sociales qui pourraient amener les gouvernements à prendre des décisions hâtives basées sur un savoir technique insuffisant.

Le professeur **David D. Allen**, du Centre des sciences de la santé de la Texas Tech University, à Amarillo, et son équipe travaillent sur de nouvelles nanoparticules qui pourront traverser sans risques la barrière hémato-méningée dans le but d'aller déposer des médicaments dans certaines parties du cerveau.

La barrière hémato-méningée est constituée de couches de cellules endothéliales au sein des vaisseaux sanguins du cerveau et sert de bouclier contre les toxines. Les cellules endothéliales tapissent la totalité des vaisseaux sanguins. Elles influencent le flot sanguin et le développement de nouveaux vaisseaux. La plupart des médicaments utilisés à ce jour ne peuvent dépasser cette barrière. Le problème est que l'on doit pouvoir traverser cette barrière pour traiter les maladies dégénératives du cerveau comme la maladie de Parkinson ou d'Alzheimer.

Des études préliminaires sur des animaux de laboratoire ont montré que les nanoparticules traversaient la barrière sans causer de dommages ou affecter l'alimentation normale du cerveau. Des expériences avec des nanoparticules

On a constaté la tendance des nanoparticules de moins de 50 nm à infiltrer les cellules.

La question est alors de savoir où se dirigent ces nanoparticules et comment elles sont distribuées dans le corps.

marquées de façon radioactive ont montré que 25 à 40 % arrivaient au cerveau, pourcentage comparable aux médicaments utilisés pour traiter des dysfonctionnements du système nerveux central.

Le danger relié à ces études est le fait que les mécanismes d'ingestion d'aliments dans le cerveau sont encore méconnus et devront faire l'objet d'études poussées avant de pouvoir utiliser les nanomatériaux comme agents de livraison de médicaments.

D'autres études se sont penchées sur la toxicité des diverses nanoparticules au point de vue cellulaire.

**Trois constatations majeures peuvent ressortir :**

- 1) La toxicité des nanoparticules varie beaucoup d'un type à l'autre en fonction de leurs propriétés intrinsèques, ce qui complique l'étude toxicologique.
- 2) Les études dans ce domaine se sont intéressées aux effets dans des milieux cellulaires restreints; il sera donc difficile de prévoir les effets sur des organismes complexes tels que le corps humain.
- 3) Les nanoparticules sont produites généralement par une large variété de procédés à haute température, tels que la combustion d'essence ou la soudure, et se retrouvent spontanément dans l'air. L'inhalation est donc le moyen le plus répandu d'être exposé aux nanoparticules, qui pourraient ainsi se retrouver dans le système respiratoire et éventuellement finir dans des organes comme le foie ou encore dans les systèmes nerveux central et cardiovasculaire. À ce jour, il demeure encore beaucoup d'inconnues quant aux effets des nanoparticules sur ces composantes du corps humain.

**Günter Oberdörster**, professeur de toxicologie à l'université de Rochester (N.Y.), a étudié les effets sur la santé des nanoparticules en suspension dans l'air (en milieu extérieur ou de travail). Il est arrivé à la conclusion que les particules ultrafines (dont la taille est inférieure à 100 nm) sont plus susceptibles d'entraîner des dommages inflammatoires aux poumons que les plus grosses. Dans une de leurs études, le professeur Oberdörster et ses collègues ont découvert que les particules de polytétrafluoroéthylène (PTFE), qui peuvent être produites simplement en surchauffant des fils électriques dont l'isolant est constitué de PTFE, peuvent être hautement toxiques pour les rats. Pendant 15 minutes, les

rats ont inhalé des vapeurs de PTFE contenant des particules de taille avoisinant 18 nm. La grande majorité sont morts en quelques heures de dommages sévères aux poumons. Quand les vapeurs étaient moins fraîches et que les nanoparticules s'étaient agglomérées en particules de 130 nm, les effets étaient beaucoup moins néfastes. Selon Oberdörster, cette baisse de toxicité serait due à la plus grosse taille des particules et au changement de leurs propriétés chimiques de surface.

Par ailleurs, le professeur rappelle que la plupart des gens sont exposés sur une base régulière aux particules ultrafines présentes dans la pollution ambiante reliée aux automobiles et qu'on aurait peut-être plus à craindre de ces technologies « bas de gamme » que de la haute technologie qui produit les fameuses nanoparticules.

Selon le toxicologue **Chiu-wing Lam** des laboratoires Wyle au National Aeronautics & Space Administration's Johnson Space Center à Houston, l'émergence des nanotubes de carbone dans l'industrie va augmenter notre niveau d'exposition aux nanoparticules, d'où le besoin pressant d'évaluer les risques pour la santé que présentent les nanotubes. Lam a donc décidé d'étudier les effets toxiques des SWNTs (*Single-Walled NanoTubes*), des particules de *carbone black* et du quartz sur des souris de laboratoire. Le groupe de recherche a constitué deux groupes de souris, la santé des premières étant évaluée après sept jours et celle des dernières après quatre-vingt-dix jours d'observation. Les résultats de l'étude ont donné les conclusions suivantes: le *carbone black* donne des effets pathologiques mineurs, de fortes doses de quartz (0,5 mg/souris) ont produit des effets moyens à modérés, et les essais avec les SWNTs ont donné de microscopiques nodules appelés « granulomas », lésions qui ont empiré au sein du groupe des quatre-vingt-dix jours. Ces nodules sont des réactions de l'organisme qui tente d'isoler les nanotubes de carbone des tissus environnants. Selon Lam, ces « granulomas » peuvent amener d'autres lésions pulmonaires. Il s'avère donc que les nanotubes dans les poumons sont plus toxiques que le *carbone black* et le quartz.

Le toxicologue **David B. Warheit**, du laboratoire Haskell des sciences environnementales et de la santé (Newark, Del.), et son équipe ont mené une autre étude plus complète sur la toxicité des nanotubes SWNTs, qu'ils ont introduits dans

La plupart des gens sont exposés sur une base régulière aux particules ultrafines présentes dans la pollution ambiante reliée aux automobiles et (...) on aurait peut-être plus à craindre de ces technologies « bas de gamme » que de la haute technologie qui produit les fameuses nanoparticules.

la trachée de rats. Ils ont examiné leurs poumons après 24 h, une semaine, un mois et trois mois. Ils ont aussi introduit des particules de quartz ou de fer de grande pureté à d'autres rats pour permettre la comparaison. Les résultats ont été les suivants :

- Après 24 h, 15 % des rats ayant reçu de fortes doses de nanotubes (5 mg par kg de poids des rats) sont morts, par cause d'agglomération des nanotubes, ce qui a obstrué les voies respiratoires et entraîné la suffocation.
- Ceux qui ont survécu montraient des inflammations passagères des poumons et des dommages aux cellules résultant principalement de l'obstruction des voies respiratoires.
- Le nombre des agglomérations de nanotubes ne semble pas être relié à la dose administrée et a même baissé durant les deux derniers mois d'observation.

Dans la dernière analyse, Warheit a rapporté que les sujets exposés aux nanotubes ne montraient pas de réponse inflammatoire persistante. Par contre, ceux qui ont été exposés au quartz ont révélé une réponse inflammatoire soutenue et dépendante de la dose administrée, accompagnée d'une toxicité cellulaire. Les autres sujets n'ont pas montré d'effet néfaste significatif. Les résultats contradictoires obtenus à propos des sujets qui ont subi l'exposition aux nanotubes ont incité Warheit et ses collègues à analyser la valeur physiologique de leurs résultats. Contrairement aux autres particules étudiées, les nanotubes ont tendance à s'agglomérer en « nanocordes », résultat d'interactions électrostatiques. Ce qui amène à croire que même si les particules de nanotubes pénètrent l'air environnant, elles ne seront peut-être pas respirables.

Pour dissiper ces incertitudes, tout le monde s'accorde pour recommander de poursuivre l'étude des impacts de l'inhalation de nanotubes.

Au Québec, il n'y a pas, à ce jour, de publication qui traite de la question des conséquences à long terme de l'utilisation des nanomatériaux ou des applications à long terme des nanotechnologies, même si l'on reconnaît l'importance du fait que certaines questions doivent être posées dès maintenant. Selon Robert Sing, de NanoQuébec, il faut, d'une part, se doter de stratégies pour contrôler des situations dans lesquelles les effets pervers et nocifs des nanotechnologies apparaîtraient; d'autre part, il faut éviter de freiner l'enthousiasme ou l'esprit innovateur des entreprises locales qui seraient moins enthousiastes à l'idée d'investir dans un domaine où il n'existe pas de cadre réglementaire alors que les risques sont réels.

# Conclusion

Les nanotechnologies représentent sans nul doute le nerf de la prochaine révolution technologique. En émergence depuis la fin des années 90, leurs percées vont bouleverser tous les champs technologiques et scientifiques. Les nanotechnologies et les nanosciences ont la particularité scientifique, par rapport aux autres champs, qu'elles opèrent à des dimensions nanométriques où la matière que l'on manipule présente de nouvelles propriétés jusqu'alors inconnues. Par ailleurs, le succès des recherches dans le domaine des nanotechnologies ne peut résulter que de la convergence des efforts de plusieurs acteurs opérant dans différentes disciplines scientifiques et technologiques (informatique, mathématiques, génie, chimie, physique, biologie, etc.).

Les différentes applications en nanotechnologie ont été regroupées en trois principaux champs: les nanomatériaux, la nanoélectronique et les nanobiotechnologies. Les nanomatériaux représentent le domaine d'application le plus prometteur en matière de commercialisation à court terme. En nanoélectronique, les limites de miniaturisation que connaîtront bientôt les techniques conventionnelles de photolithographie seront comblées par une série de nouvelles techniques, certaines plus prometteuses que d'autres. Les transformations dans le domaine de l'électronique qui découleront des percées dans ces domaines seront radicales. Les nanotechnologies sont porteuses de beaucoup d'espoir pour le domaine de la santé, car à long terme elles permettront d'aller au cœur des cellules et de repousser ainsi les limites de la médecine traditionnelle. Grâce aux nanobiotechnologies, on va pouvoir observer la nature de plus près pour mieux la comprendre et par la suite corriger ses dysfonctionnements ou encore améliorer ses performances.

Du point de vue économique, les fonds attribués à la recherche dans le domaine des nanotechnologies proviennent principalement de fonds gouvernementaux. À cet égard, le Canada accuse un certain retard sur l'échiquier international. Un plan de développement dans le domaine des nanotechnologies supporté par un effort gouvernemental a été créé en 2001, celui de l'Institut national de nanotechnologie, situé en Alberta. Au Québec, le réseau universitaire québécois NanoQuébec a été créé par Valorisation Recherche Québec, dans le but de se doter d'un programme concerté de recherche dans ce domaine en émergence.

Le succès des recherches dans le domaine des nanotechnologies ne peut résulter que de la convergence des efforts de plusieurs acteurs opérant dans différentes disciplines scientifiques et technologiques (informatique, mathématiques, génie, chimie, physique, biologie, etc.).

Il n'existe à ce jour aucune étude concluante sur l'évaluation des dangers qui pourraient être directement reliés aux nanotechnologies, car l'état d'avancement des nanosciences et des nanotechnologies ne permet pas encore de connaître et de bien évaluer les risques. La tendance est souvent de minimiser ces risques, étant donné la vaste étendue des applications possibles et envisagées. Il n'en demeure pas moins que ce problème est de plus en plus soulevé dans la communauté scientifique. En matière d'environnement, les risques potentiellement soulevés par l'arrivée des nanotechnologies seront reliés au fait que l'on pourra mettre en circulation des matériaux aux propriétés avantageuses (économies en énergie, par exemple) mais dont le contre-coup serait l'absence de techniques de recyclage testées et approuvées. La production et l'entreposage des nanomatériaux sont aussi sujets à risques étant donné la réactivité accrue de ceux-ci. Dans le domaine de la santé, les risques liés aux nanotechnologies ont été le sujet de quelques études qui, jusqu'à maintenant, n'ont pas abouti à des résultats concluants mais n'éliminent pas la possibilité de dangers. La difficulté de ce genre d'étude est que la diversité des nanomatériaux fait qu'il n'y aura pas de réponse unique. Les tests effectués sur des rats en laboratoire pour évaluer les effets des nanotubes de carbone sur la santé ne sont pas unanimes. Il reste encore beaucoup de recherche à faire dans ce domaine.

Cela étant dit, la Politique intégrée de produits (PIP) est une nouvelle politique publique qui vise précisément l'amélioration continue de la performance environnementale des produits et services, en minimisant les dommages environnementaux causés par les produits ou services tout au long de leur cycle de vie, depuis la conception, la fabrication, l'assemblage, le marketing et la distribution jusqu'au traitement des déchets. Elle combine les connaissances en matière d'analyse de cycle de vie (ACV) avec une stratégie qui implique une politique sur le développement de produits, le commerce, la consommation, l'environnement, etc. Une telle approche implique la participation active des parties intéressées qui, de concert avec le marché, incitent les entreprises à offrir des produits et des services qui exercent le moins d'impact possible sur l'environnement et qui utilisent moins de ressources naturelles. La livraison de nouveaux produits devrait être basée sur une telle approche holiste.

L'état d'avancement des nanosciences et des nanotechnologies ne permet pas encore de connaître et de bien évaluer les risques. La tendance est souvent de minimiser ces risques, étant donné la vaste étendue des applications possibles et envisagées.



# Bibliographie

Administration éco-responsable:  
[www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/information/fiche5\\_2.htm](http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/information/fiche5_2.htm)

Agilent 21000 Bioanalyser: [www.chem.agilent.com](http://www.chem.agilent.com)

Albany Nanotech: [www.albanynanotech.org](http://www.albanynanotech.org)

Blottière, L. (2002). « Cancer du sein: des puces à la rescousse », *La Recherche*, mai, n° 353, p. 14-15.

Braun, D. et P. Fromherz (2001). « Fast voltage transients in capacitive silicon-to-cell stimulation », *Physical Review Letters*, vol. 86, p. 2905.

Conseil de la Science et de la Technologie du Québec (2001): *Les Nanotechnologies, la maîtrise de l'infiniment petit*. Avis Québec [www.cst.gouv.ca](http://www.cst.gouv.ca)

Cycle de vie d'un produit,  
[www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm](http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm).

Dagani, R. (2003). « Nanomaterials: Safe or unsafe? », *Science & Technology*, avril.

Dekker, C. (1999). « Carbon nanotubes as molecular quantum wires », *Physics Today*, vol. 52, n° 5, p. 22-28.

Jacoby, M. (2002). « Nanoscale Electronics », *C&EN*, 30 septembre, vol. 80, n° 39.

Nano Québec: [www.nanoquebec.ca](http://www.nanoquebec.ca)

« Nanoscale Iron Could Help Cleanse the Environment » NSF (National Science Foundation) (2003), Press Release 03-94, 3 septembre.

National Nanotechnology Initiative: [www.nano.gov](http://www.nano.gov)

Pautrat, Jean-Louis (2002), *Demain le nanomonde. Voyage au cœur du minuscule*, Éditions Fayard, Le temps des sciences.

Roco, M.C. Senior Advisor for Nanotechnology, « International Strategy for Nanotechnology Research and Development » National Science Foundation.

Royal Academy of Engineering: [www.raeng.org.uk](http://www.raeng.org.uk)

Royal Society: [www.rsc.ca](http://www.rsc.ca)

Samson Bélaire Deloitte & Touche (2003). « Portrait des activités de nanotechnologies au Québec », février.

Taylor, J. M. (2002). « New Dimensions for Manufacturing - A UK Strategy for Nanotechnology », report of the UK Advisory Group on Nanotechnology Applications submitted to Lord Sainsbury, Minister for Science and Innovation, Juin. Disponible sur: [www.dti.gov.uk/innovation/nanotechnologyreport.pdf](http://www.dti.gov.uk/innovation/nanotechnologyreport.pdf)

Service R. F. (2000). « Is nanotechnology dangerous? », *Science*, Washington, 24 novembre.

Zeck, G. et P. Fromherz (2001). « Noninvasive neuroelectronic interfacing with synaptically connected snail neurons immobilized on a semiconductor chip », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, p. 10457.

Zhang, Wei-Xian (2003). « Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview », *Journal of Nanoparticle Research*, 5:323-332.



## Quelques-uns des plus récents Rapports bourgogne publiés par le CIRANO

### **Les terrains contaminés au Québec: quels sont les risques pour les prêteurs ?**

Sophie Lavallée, mai 2006

### **Pour un financement durable de la santé au Québec**

Claude Montmarquette, Joanne Castonguay, Virginie Giroux, décembre 2005

### **L'utilisation des nouvelles technologies par les consommateurs et les détaillants canadiens**

Jacques Nantel, décembre 2005

### **La problématique de la dette publique au Québec: causes, conséquences, solutions**

Marcelin Joanis et Claude Montmarquette, septembre 2005

### **La réglementation de l'énergie au Québec**

Robert Clark et Andrew Leach, mai 2005

### **Les conflits de localisation: le syndrome NIMBY**

Nicolas Marchetti, mai 2005

### **Efficacité et navigabilité d'un site Web: rien ne sert de courir, il faut aller dans la bonne direction**

Jacques Nantel et Abdelouahab Mekki Berrada, avril 2005

### **La dimension territoriale des politiques de développement économique au Québec: enjeux contemporains**

Marcelin Joanis et Fernand Martin, février 2005

### **Les partenariats public-privé: une option à découvrir**

Benoît A. Aubert et Michel Patry, mars 2004

### **Le rôle du gouvernement québécois dans le capital de risque**

Jean-Marc Suret, mars 2004

### **Les Web Services et leur impact sur le commerce B2B**

Gilbert Babin et Michel Leblanc, septembre 2003

### **Enjeux et défis de la réglementation canadienne des valeurs mobilières**

Jean-Marc Suret et Cécile Carpentier, août 2003

Ces publications sont disponibles sur le site [www.cirano.qc.ca](http://www.cirano.qc.ca)



2020, rue University, 25<sup>e</sup> étage, Montréal (Québec) H3A 2A5

Tél.: (514) 985-4000 • Téléc.: (514) 985-4039

[www.cirano.qc.ca](http://www.cirano.qc.ca) • [info@cirano.qc.ca](mailto:info@cirano.qc.ca)

Conception et réalisation graphique : PR communications inc.

Impression : Imprimerie des Anses, Chandler

Mai 2006