

2004s-44

**Les Nanotechnologies : leurs  
bénéfices et leurs risques  
potentiels**

*Dina Feigenbaum, Albert Nsamirizi,  
Bernard Sinclair-Desgagné*

---

**Série Scientifique**  
*Scientific Series*

---

**Montréal**  
**Septembre 2004**

© 2004 Dina Feigenbaum, Albert Nsamirizi, Bernard Sinclair-Desgagné. Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©.  
*Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*



## CIRANO

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

*CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Québec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, and grants and research mandates obtained by its research teams.*

### *Les organisations-partenaires / The Partner Organizations*

#### PARTENAIRE MAJEUR

. Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche [MDERR]

#### PARTENAIRES

. Alcan inc.  
. Axa Canada  
. 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  
. Développement des ressources humaines Canada [DRHC]  
. Fédération des caisses Desjardins du Québec  
. GazMétro  
. Hydro-Québec  
. Industrie Canada  
. Ministère des Finances du Québec  
. Pratt & Whitney Canada Inc.  
. Raymond Chabot Grant Thornton  
. Ville de Montréal  
  
. École Polytechnique de Montréal  
. HEC Montréal  
. Université Concordia  
. Université de Montréal  
. Université du Québec à Montréal  
. Université Laval  
. Université McGill  
. Université de Sherbrooke

#### ASSOCIE A :

. Institut de Finance Mathématique de Montréal (IFM<sup>2</sup>)  
. Laboratoires universitaires Bell Canada  
. Réseau de calcul et de modélisation mathématique [RCM<sup>2</sup>]  
. Réseau de centres d'excellence MITACS (Les mathématiques des technologies de l'information et des systèmes complexes)

Les cahiers de la série scientifique (CS) visent à rendre accessibles des résultats de recherche effectuée au CIRANO afin de susciter échanges et commentaires. Ces cahiers sont écrits dans le style des publications scientifiques. Les idées et les opinions émises sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.

*This paper presents research carried out at CIRANO and aims at encouraging discussion and comment. The observations and viewpoints expressed are the sole responsibility of the authors. They do not necessarily represent positions of CIRANO or its partners.*

# Les Nanotechnologies : leurs bénéfices et leurs risques potentiels

*Dina Feigenbaum<sup>\*</sup>, Albert Nsamirizi<sup>†</sup>,  
Bernard Sinclair-Desgagné<sup>‡</sup>*

## Résumé / Abstract

Ce rapport est une introduction au domaine fascinant des nanotechnologies. Le but est de définir ce qu'est la nanotechnologie, évaluer sa portée en termes d'applications, en connaître les principaux acteurs, et évaluer les dangers potentiels qui pourraient émaner de ce domaine en effervescence. En introduction, un bref historique ainsi que les différentes définitions accordées au terme nanotechnologie seront exposés. Ensuite, les différentes applications connues à ce jour et envisagées seront regroupées selon les trois domaines les plus importants des nanotechnologies. L'aspect économique sera abordé dans la troisième partie avant d'aborder la question des risques pour la santé et l'environnement. Finalement, les difficultés que posent l'application de la politique intégrée des produits en rapport avec les nanotechnologies et l'importance de l'Analyse de Cycle de Vie dans l'intégration de cette politique seront mentionnées dans la conclusion.

**Mots clés :** nanotechnologies, nanosciences, nanoélectronique, nanomatériaux, nanoparticules, nanobiotechnologies, biopuces, NanoQuébec, nanotubes de carbone, risques technologiques, politique intégrée de produits, ACV, développement durable.

*This report is an introduction to the nanotechnology uprising fields. In the first section, different definitions of the nanotechnology term are given. Then, the various applications known to date and expected in the near future will be gathered according to the three most important fields of the nanotechnologies. The economic aspect will be treated in the third part before tackling the question of health and environment risks. Finally, the challenges to design an Integrated Product Policy for nanoproducts and process, as well as the importance and difficulties of elaborating a complete Life Cycle Assessment for implementing such a policy will be pointed out in the conclusion.*

**Keywords:** nanotechnology, nanosciences, nanoelectronics, nanomaterials, nanoparticules, nanobiotechnologies, bioanalyser, NanoQuebec, carbon nanotubes, technological risk, Integrated Product Policy, LCA, sustainable development.

---

<sup>\*</sup> Dina Feigenbaum, CIRANO et HEC Montréal, 2020 rue University, 25<sup>è</sup> étage, Montréal, Québec, Canada, H3A 2A5, courriel : dina.feigenbaum@cirano.qc.ca.

<sup>†</sup> Albert Nsamirizi, CIRANO, 2020 rue University, 25<sup>è</sup> étage, Montréal, Québec, Canada, H3A 2A5, courriel : albert.nsamirizi@polymtl.ca.

<sup>‡</sup> Bernard Sinclair-Desgagné, CIRANO, CIRAIG et HEC Montreal, rue University, 25<sup>è</sup> étage, Montréal, Québec, Canada, H3A 2A5, courriel : bernard.sinclairdesgagne@cirano.qc.ca.

# Table des matières

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUCTION</u></b> .....	<b>5</b>
<u>1.1</u>	<u>HISTORIQUE</u> .....	5
<u>1.2</u>	<u>LES DÉFINITIONS</u> .....	6
<u>1.3</u>	<u>LE MICROSCOPE À EFFET TUNNEL</u> .....	8
<b><u>2</u></b>	<b><u>APPLICATIONS</u></b> .....	<b>11</b>
<u>2.1</u>	<u>NANO-ÉLECTRONIQUE</u> .....	11
<u>2.1.1</u>	<u><i>La Course à la miniaturisation (loi de Moore)</i></u> .....	11
<u>2.1.2</u>	<u><i>Limites de la photolithographie (loi de Moore contre-carrée)</i></u> .....	12
<u>2.1.3</u>	<u><i>Solutions pour repousser les limites de la lithographie</i></u> .....	13
<u>2.1.4</u>	<u><i>Problème à prévoir : l'effet tunnel</i></u> .....	14
<u>2.1.5</u>	<u><i>Alternatives à la lithographie classique</i></u> .....	14
<u>2.2</u>	<u>LES NANOMATÉRIAUX</u> .....	16
<u>2.2.1</u>	<u><i>Applications des nanomatériaux</i></u> .....	16
<u>2.2.2</u>	<u><i>Exemple d'applications : Les nanotubes de carbone</i></u> .....	17
<u>2.2.3</u>	<u><i>Exemple d'applications : la nanopoudre de fer</i></u> .....	20
<u>2.2.4</u>	<u><i>Commercialisation</i></u> .....	21
<u>2.3</u>	<u>LES NANOBIOTECHNOLOGIES</u> .....	22
<u>2.3.1</u>	<u><i>La Biopuce</i></u> .....	22
<u>2.3.2</u>	<u><i>Association neurones-transistors</i></u> .....	26
<u>2.3.3</u>	<u><i>Commercialisation</i></u> .....	27
<b><u>3</u></b>	<b><u>DONNÉES ÉCONOMIQUES ET POLITIQUES NATIONALES</u></b> .....	<b>28</b>
<u>3.1</u>	<u>INVESTISSEMENTS</u> .....	28
<u>3.2</u>	<u>POLITIQUE AU CANADA</u> .....	30
<u>3.3</u>	<u>POLITIQUE AU QUÉBEC</u> .....	31
<u>3.3.1</u>	<u><i>VRQ – NanoQuébec</i></u> .....	31
<u>3.3.2</u>	<u><i>CRSNG</i></u> .....	34
<b><u>4</u></b>	<b><u>ÉVALUATION DES RISQUES</u></b> .....	<b>36</b>
<u>4.1</u>	<u>RISQUES LIÉS AUX NANOMATÉRIAUX</u> .....	36
<u>4.1.1</u>	<u><i>Environnement</i></u> .....	36
<u>4.1.2</u>	<u><i>Entreposage</i></u> .....	37
<u>4.1.3</u>	<u><i>Risques pour la santé</i></u> .....	37
<u>4.2</u>	<u>ÉTHIQUE</u> .....	40
<b><u>5</u></b>	<b><u>CONCLUSION</u></b> .....	<b>41</b>

## **TABLE DES FIGURES**

<a href="#"><u>FIGURE 1-1: PRINCIPE DU MICROSCOPE À EFFET TUNNEL</u></a> .....	8
<a href="#"><u>FIGURE 1-2: CERCLE D'ATOMES DE FER SUR SURFACE DE CUIVRE</u></a> .....	9
<a href="#"><u>FIGURE 1-3: ÉCRITURE ATOMIQUE</u></a> .....	9
<a href="#"><u>FIGURE 1-4: A) MILLIPEDE EN ACTION B) CIRCUIT ÉLECTRIQUE CONTRÔLANT LES 1024 POINTES QUI SE REJOIGNENT DANS UN CARRÉ DE 3MMX3MM</u></a> .....	10
<a href="#"><u>FIGURE 2-1: PRINCIPE DE LA PHOTOLITHOGRAPHIE</u></a> .....	12
<a href="#"><u>FIGURE 2-2: LE PLUS PETIT TRANSISTOR FONCTIONNEL</u></a> .....	14
<a href="#"><u>FIGURE 2-3: AGENCEMENT DES ATOMES DE CARBONE DANS UN NANOTUBE</u></a> .....	18
<a href="#"><u>FIGURE 2-4: NANOTUBES DE CARBONE AUTO-ASSEMBLÉS SUR UNE SURFACE DE SILICE FONCTIONNALISÉE</u></a> .....	18
<a href="#"><u>FIGURE 2-5: DÉCONTAMINATION DE SOLS POLLUÉS PAR LES NANOPOUDRES DE FER</u></a> .....	21
<a href="#"><u>FIGURE 2-6: REPRÉSENTATION DE L'ADN</u></a> .....	22
<a href="#"><u>FIGURE 2-7: ENSEMBLE DES GÈNES EXPRIMÉS PAR UNE CELLULE DE LEVURE, RÉVÉLÉS PAR UNE BIOPUCE</u></a> .....	24
<a href="#"><u>FIGURE 2-8: BIOPUCE À HAUTE DENSITÉ</u></a> .....	25
<a href="#"><u>FIGURE 2-9: NEURONE D'UN CERVEAU DE RAT DÉPOSÉ SUR UN ENSEMBLE DE TRANSISTOR</u></a> .....	27
<a href="#"><u>FIGURE 2-10: BIOANALYSER 2100 D'AGILENT TECHNOLOGIES</u></a> .....	28
<a href="#"><u>FIGURE 3-1: INVESTISSEMENTS NATIONAUX EN R&amp;D POUR LA NANOTECHNOLOGIE (AOÛT 2001)</u></a> .....	29

# 1 Introduction

## 1.1 Historique

À 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 constitutifs. Dès 1959, le 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 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 60 atomes de carbone. Enfin en 1991, S. Iijima découvre les nanotubes de carbone qui sont un élément incontournable des nanotechnologies. À partir de ce moment, 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 un groupe d'experts se réunissent régulièrement pour discuter des plans et programmes dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Ce groupe continue officieusement ses activités jusqu'en 1998 où on crée le « Interagency Working Group on Nanotechnology » (IWGN) qui deviendra plus tard en 2000 le NNI, National Nanotechnology Initiative, ce qui marque le début de l'ère des nanosciences.

## 1.2 Les Définitions

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

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

Définition tirée du livre « *Demain le nanomonde, Voyage au cœur du minuscule* », 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 pour éviter d'inclure dans le domaine des nanotechnologies tous les scientifiques en hautes technologies. Cependant, il faut aussi éviter d'être trop restrictif car cela négligerait 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. »

- *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 physique conventionnelle ne s'appliquent plus de la même manière. Les propriétés physiques, chimiques, biologiques à l'échelle nanométrique ne peuvent être directement déduites de celles 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 à notre échelle à nos besoins et les conséquences prévisibles sont presque infinies à partir de cette supposition. Certains parlent même 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.

### 1.3 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 de 1986. Outil de haute précision permettant de « voir » les surfaces des matériaux avec une résolution atomique, il peut opérer dans plusieurs conditions extrêmes (pression, température, magnétisme), servir de nano-outil de structuration des surfaces et d'étudier les 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 nanomètre 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 tracer une représentation de la topographie de surface.

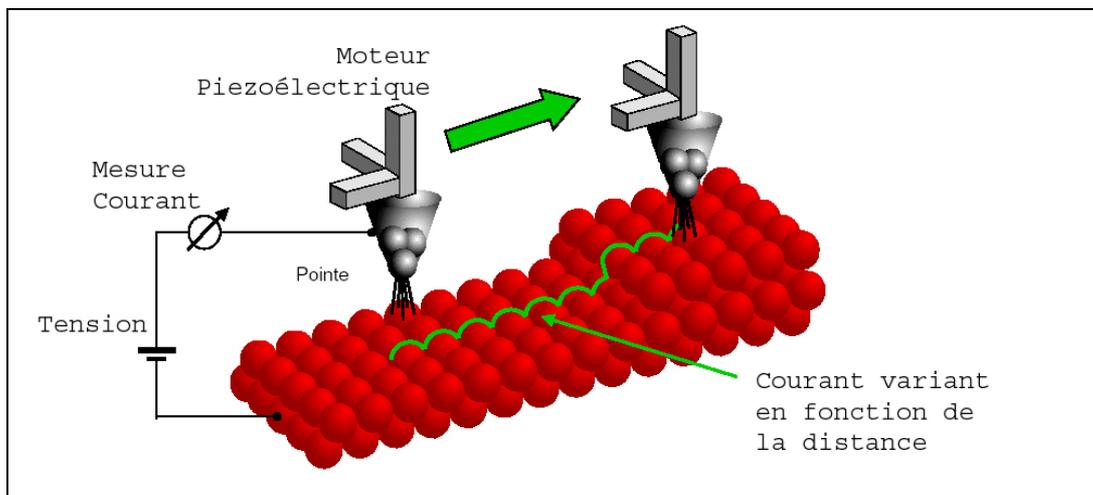


Figure 1-1: Principe du Microscope à Effet Tunnel

### 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 1.2 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 et ensuite la pointe du microscope sert 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 ».

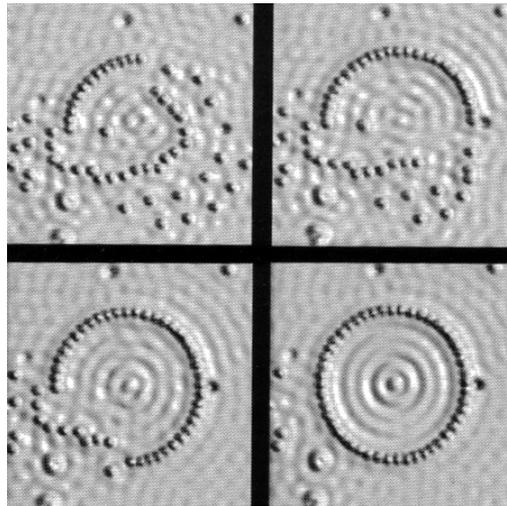


Figure 1-2: Cercle d'atomes de fer sur surface de cuivre

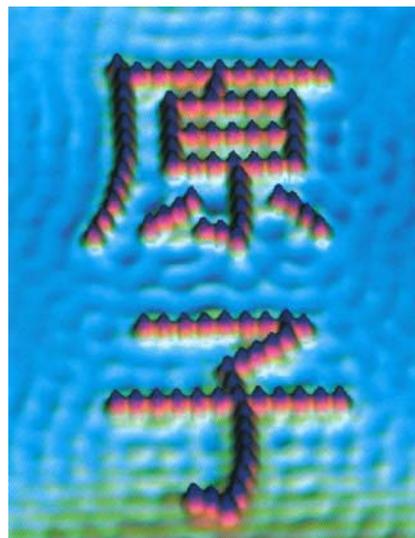
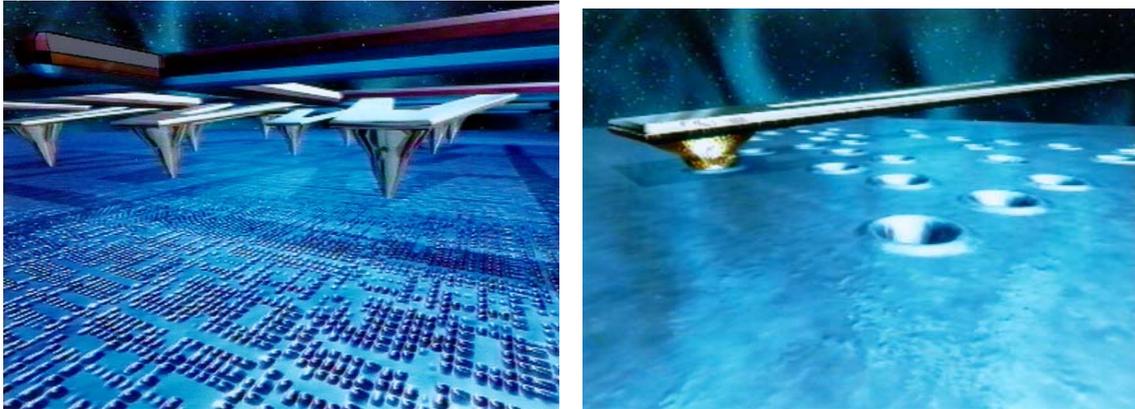
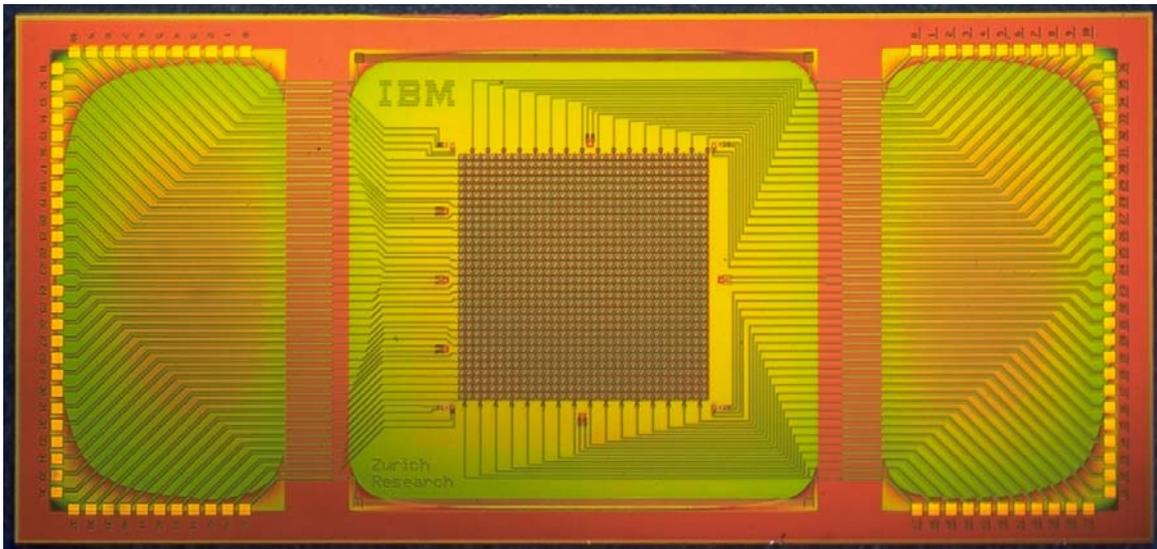


Figure 1-3: Écriture atomique

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 32x32 (1024) pointes pouvant toutes écrire sur un disque d'enregistrement, chaque pointe pouvant se déplacer indépendamment des autres. Une indentation 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>.



a)



b)

Figure 1-4: a) Millipede en action b) Circuit électrique contrôlant les 1024 pointes qui se rejoignent dans un carré de 3mmx3mm

## 2 Applications

Dans le but de faciliter l'étude des avancées technologiques dans le domaine des nanotechnologies, nous allons regrouper les applications en trois principaux champs, à savoir la nanoélectronique, les nanomatériaux, et les bionanotechnologies.

### 2.1 Nano-électronique

#### 2.1.1 La Course à la miniaturisation (loi de Moore)

La miniaturisation des composants électroniques des ordinateurs a été un moteur important dans le développement des nanotechnologies 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 de la compagnie 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 18 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 chances qu'il présente des anomalies le rendant non fonctionnel. Et deuxièmement, la rentabilité économique de la fabrication de composantes électroniques est accrue si la miniaturisation des transistors permet d'inclure plus de circuits sur une même plaque de silicium.

Dans les premières semaines de Mars 2000, les compagnies Intel et Advanced Micro Devices (communément désigné par son abréviation AMD), mettent sur le marché les premiers processeurs fonctionnant à 1 GHz. À ce moment là, certains analystes déclarent que les besoins du marché peuvent amplement être satisfaits avec de telles performances. Mais la concurrence et la course au contrôle des marchés étant de très bon stimulateurs de recherche et développement, trois ans plus tard, le processeur le plus puissant d'AMD peut monter jusqu'à 3.2 GHz pour un coût de 464\$ US alors qu'à ses débuts le Pentium III d'1 GHz coûtait 990\$ US, au moment où Intel détient 80% du marché.

Cette ascension fulgurante est en train de connaître sa fin. La courbe de la loi de Moore va bientôt frapper le mur des limites physiques imposées par les techniques de photolithographie actuelles.

## 2.1.2 Limites de la photolithographie (loi de Moore contre-carrée)

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 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.

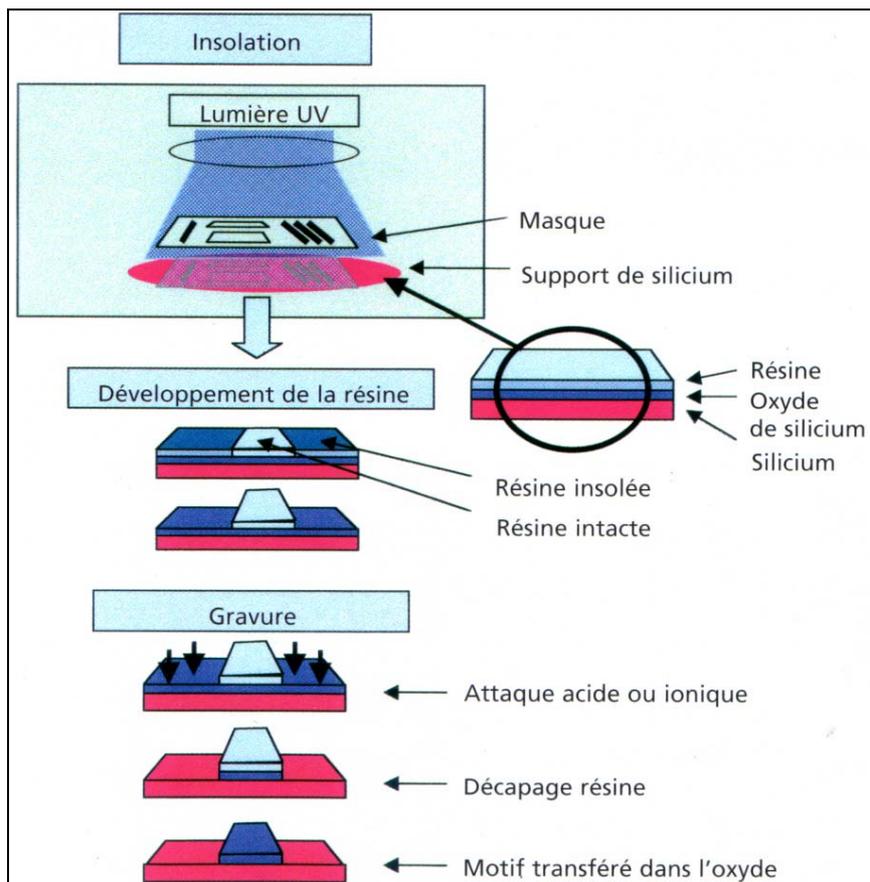


Figure 2-1: Principe de la photolithographie

Les lois de l'optique imposent une limite à la réduction des motifs à reproduire. Ces lois indiquent la résolution maximale (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 à l'utilisation de lasers excimères émettant à des longueurs d'onde de 248 ou même 193 nm (comparativement à la lumière rouge se situant à 600 nm ou l'ultraviolet inférieur à 440 nm).

### 2.1.3 Solutions pour repousser les limites de la lithographie

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

Deux problèmes font leur apparition par contre. 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 (1 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 2.1) 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 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 alternative 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 avec laquelle 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 à ces rayons qu'ils absorberaient aussitôt en 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 alternative, plus prometteuse celle-ci 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 impressionner de grandes surfaces, ce qui nécessite de tracer un grand nombre de traits rapprochés. Ce qui augmente le temps et le coût de production. La technique de lithographie électronique sera donc dédiée 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.

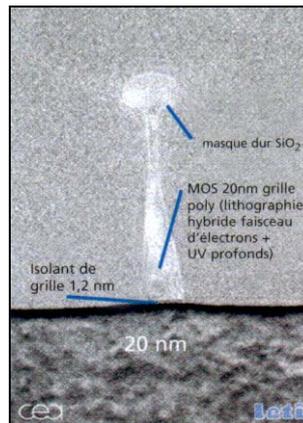


Figure 2-2: Le plus petit transistor fonctionnel

#### 2.1.4 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 se pourrait (probabilité considérable) que les charges se déplacent de la source au drain provoquant ainsi des problèmes de logique dans le circuit intégré.

#### 2.1.5 Alternatives à la lithographie classique

Les techniques présentées ci-haut 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.

### - *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. Le principe de la logique binaire est donc rendu possible.

À l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), en 2001, des chercheurs ont mené récemment des travaux permettant de synthétiser une molécule agissant comme un commutateur. Ils s'intéressent à des molécules comme les catenanes et les rotaxanes, qui peuvent être produites avec les moyens traditionnels de la chimie de synthèse. Il serait donc possible de fabriquer des transistors, des commutateurs et des résistances de façon peu coûteuse.

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 :

- Peu coûteux : Chimie de synthèse traditionnelle
- Échelle nanométrique, donc plus de capacité de calcul (100) et de mémoire (1000)

Mais aussi un gros désavantage :

- Un réseau constitué de molécules comprend beaucoup d'erreurs d'assemblage. Par exemple, le TERAMAC de HP comprenant 864 puces en avaient 75% de défectives.

### - *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 dures à surmonter : 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 cassent plus facilement).

## 2.2 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.

Plus la taille des particules constituant un matériau, plus la résistance ou (dureté) du matériau augmente. Par exemple, un matériau formé de nanoparticules de cuivre voit sa dureté augmenter approximativement selon le tableau suivant (comparaison entre la dureté du nouveau matériau par rapport au matériau ordinaire) :

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

Une autre propriété affectée par la taille des grains est la ductilité, caractéristique qui exprime la difficulté à briser le matériau sous le 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 d'expérimentation : en réduisant la taille des particules, on agit directement sur les liens atomiques du matériau qui eux 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 le choc. Ainsi, des chercheurs ont réussi à obtenir des céramiques à la fois plus dures et plus résistantes aux chocs.

### 2.2.1 Applications des nanomatériaux

#### Technologies relatives à l'énergie

- nouveaux types de cellules solaires du type Grätzell
- batteries rechargeables à haute densité d'énergie
- fenêtres intelligentes employant l'effet photochrome ou l'orientation électrique
- matériaux isolants plus efficaces
- échangeurs de chaleur réparables en-ligne dans des centrales nucléaires
- matériaux nanocristallins pour l'entreposage de l'hydrogène
- réfrigérateurs magnétiques basés sur des matériaux super paramagnétiques
- élimination des polluants dans les équipements de génération d'électricité

## Industrie automobile

protection anticorrosion  
élimination des polluants des convertisseurs catalytiques  
automobiles hybrides employant des batteries utilisant des nanomatériaux  
fenêtres intelligentes  
efficacité énergétique accrue grâce à des bougies d'allumage basées sur des nanomatériaux et des revêtements résistants à la chaleur pour les cylindres  
matériaux hybrides résistants aux éraflures  
senseurs mesurant la performance du moteur

## Optique

optique à gradation d'indice : des lentilles de plastique spécialisées  
plastiques résistant aux éraflures dans les lunettes, les lentilles, les viseurs  
revêtements anti-buée pour les fenêtres d'auto  
verres teintés à faible coût  
filtres optiques

## Senseurs hautement sensibles

senseurs pour différents gaz tels CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, et CH<sub>4</sub>  
senseurs à rayons UV et senseurs optiques robustes basés sur du siliciure de carbone nanostructuré  
détecteurs de fumée  
détecteurs de glace sur les ailes d'avion

## Catalyseurs

purificateurs d'air et d'eau photocatalytiques  
meilleure activité, sélectivité et durée de vie dans la transformation chimique et les cellules à combustible  
précurseur pour un nouveau type de catalyseur

### 2.2.2 Exemple d'applications : 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 86, 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 91, 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.

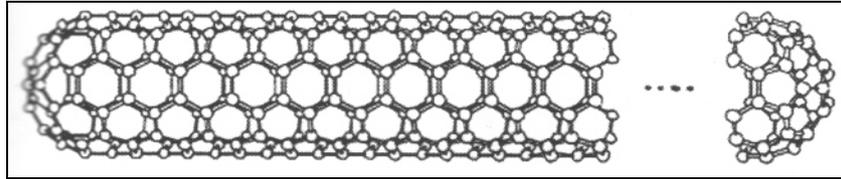


Figure 2-3: Agencement des atomes de carbone dans un nanotube

Les nanotubes sont soit métalliques, soit semi-conducteurs. Ceci 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 transporter jusqu'à 30 microampères, ce qui correspond à une densité électrique d'un milliard d'ampères par centimètre carré <sup>1</sup>.

Une autre force des nanotubes de carbone vient de leurs propriétés mécaniques améliorées : une résistance mécanique six fois supérieure à celles de fil d'acier. Ceci 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.

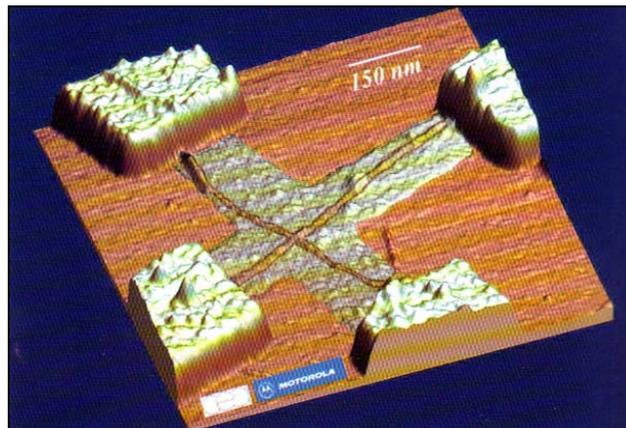


Figure 2-4: Nanotubes de Carbone auto-assemblés sur une surface de silice fonctionnalisée

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

Les nanotubes de carbones 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 10 à 15 nanomètres. Le diamètre intérieur est approximativement de 5 nanomètres. Les nanotubes sont en général long de quelques dizaines de microns. Ceci donne un rapport d'aspect de l'ordre de 100 à 1000. Les ordres de grandeur des nanotubes sont plus petits que ceux des fibres de carbone et sont morphologiquement distincts des agrégats familiaires et nodulaires de charbon. Les nanotubes de carbone sont produits à partir de matières premières de pureté chimique élevée dans des conditions d'opération rigoureuses. Ils sont donc employés dans les applications où la propreté est une condition critique. Toutes ces raisons contribuent au coût de production des nanotubes très élevé : 1500\$/kg.

### 2.2.3 Exemple d'applications : la nanopoudre de fer

Le problème de dépollution est plutôt épineux et représente des sommes colossales. Une nanopoudre produite à partir de fer, un des métaux les plus abondants sur terre, s'avère être un outil particulièrement efficace pour nettoyer le sol et les eaux souterraines souillés. Cette nouvelle est issue de la publication du 3 septembre 2003 du *Journal of Nanoparticle Research* où l'ingénieur environnementaliste Wei-xian Zhang résume le fruit de huit ans de recherche, en partie financée par la 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 même 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. Ce qui fait que de plus en plus de compagnies intègrent du fer en poudre à leurs déchets industriels avant de les jeter dans la nature.

Malheureusement, ce procédé n'est pas très utile en ce qui concerne les polluants déjà en présence 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 des particules des nanopoudres 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 meilleures). Ces poudres peuvent donc être intégrées directement au cœur de sites industriels contaminés. Une fois en place, ces poudres 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 pelleter la terre pour la traiter. Autre avantage des nanopoudres, la petite taille des nanoparticules de fer (entre 1 et 100 nanomètres) leur permet de s'intégrer à la terre sans en être prisonnier de ses particules.

Les tests en laboratoire et sur le terrain ont confirmé que le traitement aux nanopoudre peut drastiquement réduire le niveau des contaminants dans les sites pollués en un jour ou deux et les élimine complètement en quelques semaines jusqu'à ce que le site pollué rencontre les standards fédéraux en matière de qualité des eaux souterraines. 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 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 requière 11.2 kg, on peut prévoir un avenir prometteur aux nanopoudres dans le marché des décontaminants de sols pollués.

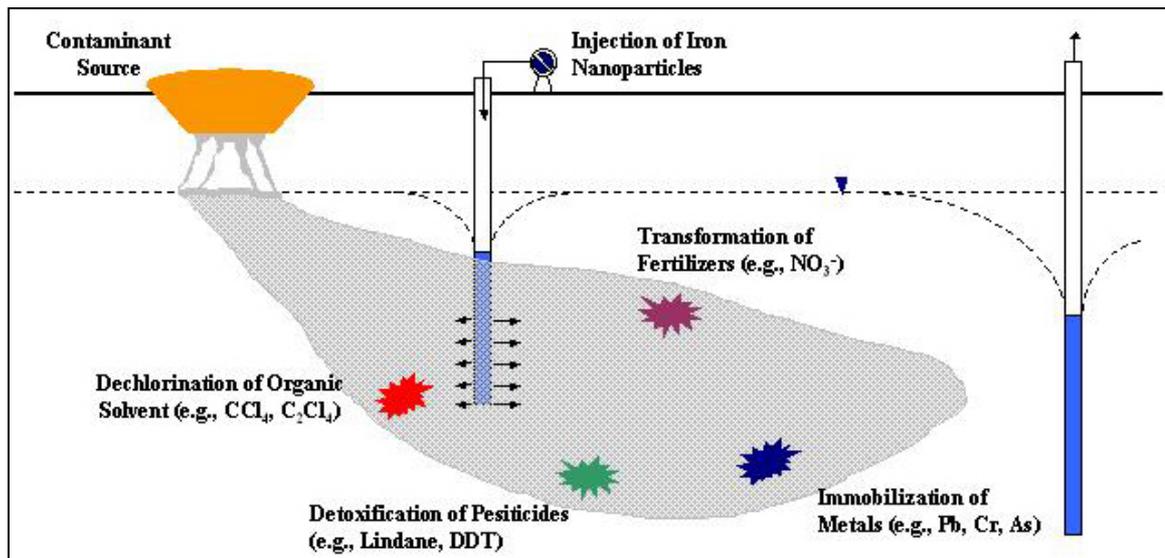


Figure 2-5: Décontamination de sols pollués par les nanopoudres de fer

## 2.2.4 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, est la première compagnie dans le domaine des nanotechnologies à partir en affaires ([www.hyperioncatalysis.com](http://www.hyperioncatalysis.com)) Cette compagnie est aussi le plus important fournisseur en nanotubes de carbones 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 certain traitement chimique est constitué de millions de fibres d'un centième-millième de pouce de long. Ce tissu améliore les propriétés des vêtements en les rendant plus imperméables, plus résistants aux tâches et aux plis.

## 2.3 Les nanobiotechnologies

Les nanotechnologies sont porteuses de beaucoup d'espoir pour le domaine de la santé car à long terme elles permettront d'aller au cœur du vivant et ainsi repousser 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.

### 2.3.1 La Biopuce

- **Notions requises**

L'ADN qui est la carte d'identité unique et infalsifiable de chaque être vivant fait l'objet de recherches scientifiques poussées depuis une cinquantaine d'années. En effet, l'Acide Désoxyribonucléique renferme toute l'information servant à expliquer cette complexe mécanique qu'est notre organisme. En trouvant les clés servant 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,  $10^{-12}$  g équivaut à 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 unique 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.

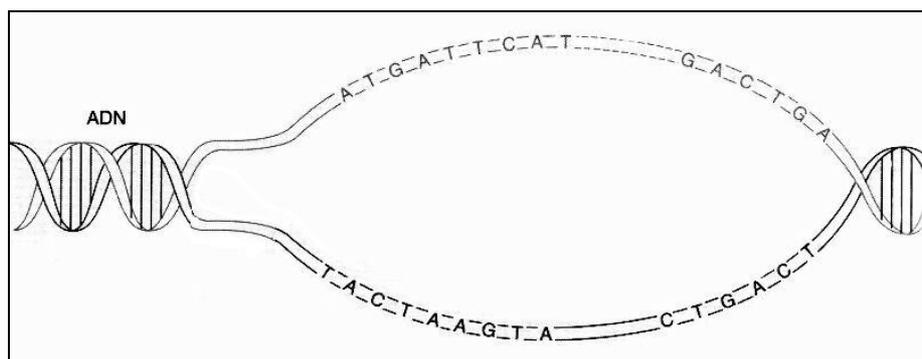


Figure 2-6: Représentation de l'ADN

- **But**

Le génome humaine compte environ 3 milliards de paires arrangées en 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 ça, 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, 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 est le but premier de la recherche dans le domaine, attribuer des fonction précises à chaque gène ou groupe de gènes. Ensuite, il s'agira de prédire les effets des mutations génétiques sur le fonctionnement du système, ceci 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 autour de 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. Et ce en respectant toujours la spécificité qui lie la base A uniquement à la base T et C avec G. 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'1 cm<sup>2</sup> sur lequel il faudra être capable de déposer dans des compartiments précis les séquences désirées dans un ordre précis. Ensuite, il faudra trouver le moyen d'identifier les spots 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 et la dernière technique utilise la technologie des têtes d'imprimantes.

- **Assemblage**

Une fois les brins d'ADN seuls assemblés avec leur brin complémentaire, il faut trouver le moyen de se rendre compte que le plot numéro X contient un double brin et ne pas confondre cette case avec sa voisine. Ceci demande donc une méthode très sensible et peu susceptible aux 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 plots indique le degré d'expression de chaque gène.



Figure 2-7: Ensemble des gènes exprimés par une cellule de levure, 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<sup>2</sup> s'est intéressée au niveau d'expression de 25 000 gènes dans les tumeurs. Les résultats montrent que l'apparition de métastases est contrôlée par 231 gènes et parmi ceux-ci, 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

---

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

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, et ce, même si la mutation génétique à détecter ne concerne qu'aussi peu qu'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 étudier sa résistance aux différents traitements. Le délai pour ces opérations peut être réduit à l'aide des biopuces haute densité à quatre ou cinq heures. Une biopuce a déjà été mise au point pour l'identification précise de la souche de l'agent pathogène de la tuberculose et évaluer la résistance aux antibiotiques que certaines mutations génétiques apportent.

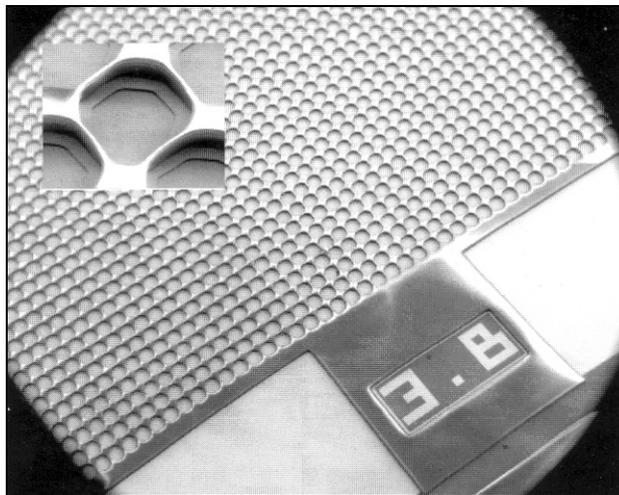


Figure 2-8: Biopuce à haute densité

- **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, de produits alimentaires ou cosmétiques pourraient utiliser des biopuces dédiées pour détecter des pollutions organiques ou microbiennes. La rapidité d'action et la portabilité des biopuces devrait 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).

### 2.3.2 Association neurones-transistors

Dans l'optique de contrôler le vivant et l'inerte dans leurs plus petites dimensions, un nouveau défi scientifique aux allures de chimère est devenu du 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, 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>.

---

<sup>3</sup> D. Braun et P. Fromherz, « 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, « Noninvasive neuroelectronic interfacing with synaptically connected snail neurons immobilized on a semiconductor chip », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, vol 98, p. 10457

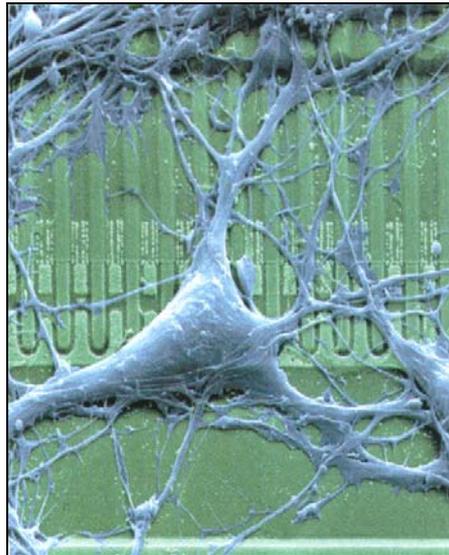


Figure 2-9: Neurone d'un cerveau de rat déposé sur un ensemble de transistor

### 2.3.3 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 microlabo 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.



## 3 Données économiques et politiques nationales

### 3.1 Investissements

L'enthousiasme et le potentiel derrière les nanotechnologies ont 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 dans le cadre de programmes 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, 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.
- Au Canada, le conseil national de recherche a créé le *National Institute of Nanotechnology* avec un budget de 120 millions \$ (CAN) sur cinq ans.
- Le Japon s'est récemment doté d'un budget de quelques 75 milliards de Yens (autour de 887 millions \$ 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 par année.
- L'Union Européenne a aussi reconnu l'importance grandissante des nanotechnologies et a alloué environ 2 milliards de dollars CAN dans le domaine, sous le programme FP6 (sixth Framework Programme) pour la période de 2002 à 2006.

Ces montants sont plutôt 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 pour certains secteurs technologiques sous-jacents dans lesquels il n'est donc plus nécessaire d'investir.

Le tableau suivant présente les estimations des investissements gouvernementaux en millions de dollars de 1997 à 2001. «Europe 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).

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

Estimations des investissements gouvernementaux en nanotechnologie

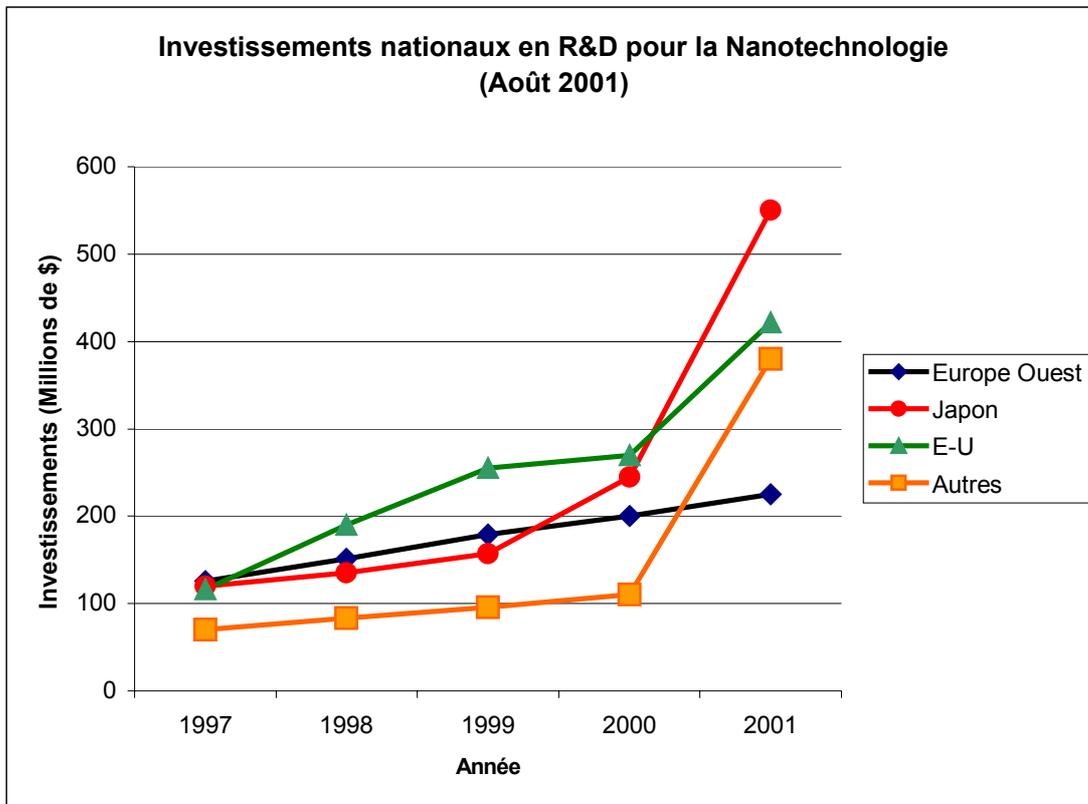


Figure 3-1: Investissements nationaux en R&D pour la Nanotechnologie (Août 2001)

## 3.2 Politique au 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 du National Institute for Nanotechnology.

Le centre de recherche de l'institut s'intéresse aux sujets suivants : structures micromagnétiques, dispositifs micro-optiques, dispositifs pour processus optiques ultra-rapides, composants micro-usinés, structures de couche minces uniques, modèles de croissance de couches minces. Également, l'Université d'Alberta qui est orientée sur la recherche offre un centre de recherche en génie électrique et informatique.

Les grandes entreprises albertaines qui supportent l'effort en nanotechnologie sont :

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

Le gouvernement albertain a ajouté 60M\$ à l'investissement de base de 60M\$ venant du conseil national de recherche 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 oeuvrant dans le domaine et l'absence de société d'investissement en capital de risque.

## 3.3 Politique au Québec

### 3.3.1 VRQ – NanoQuébec

En avril 1999, le ministre des 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. La preuve en est la création de *Valorisation Recherche Québec* (V.R.Q.) dont la mission est de contribuer à renforcer la recherche universitaire et à en accroître les retombées pour la société québécoise.

Pour ce faire, VRQ apportera 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 accordé à VRQ un deuxième fonds de 120 millions de dollars sur quatre ans (2000-2004).

C'est ainsi qu'a été créé NanoQuébec, le réseau universitaire québécois en nanosciences et nanotechnologies. Ce réseau a été créé par V.R.Q. dans le but de se doter d'un programme concerté de recherche dans ce domaine en émergence. NanoQuébec est composé des grandes institutions universitaires que sont 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.

La mission de NanoQuébec est d'amener le Québec au rang des chefs de file de la recherche et de la valorisation des nanosciences et nanotechnologies sur les scènes nationale et internationale.

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, et
- 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, allant des propriétés électroniques, mécaniques et structurales en passant par les 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, nano-systèmes, nanoélectronique et nanophotonique, applications des nanosciences aux sciences biotechnologiques et pharmaceutiques, Auto-assemblage et Patterning

### **Projets en Nanomatériaux :**

---

1. 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. Responsable: Bélanger, Daniel
2. Développement de matériaux poreux nanostructurés utilisés comme agents de rétention d'encre. Responsable: Boisvert, Jean-Philippe
3. Functional Nanopowder Synthesis for Nanograin Boundary Engineered Materials. Responsable: Gitzhofer, François
4. Nanoagrégats obtenus par implantation ionique. Responsable : Schiettekatte, Francois
5. Synthesis and Characterization of Carbon Nanotubes for Applications in Nanotechnology. Responsable: Stansfield, Barry
6. Imaging with Coherent X-rays. Responsable : Sutton, Mark

### **Projets en Nanoélectronique/Nanophotonique**

---

1. Contrôle spatial sub-100 nm des propriétés optiques d'hétérostructures semiconductrices par interdiffusion de puits quantiques. Responsable:Aimez, Vincent
2. Investigation of Self-Assembled Molecular Field Effect Transistor. Grutter, Peter
3. Tunable Photonic Bandgap Devices Based On Omnidirectional Multilayer Structures for Next-Generation Agile All-Photonic Networks. Kirk, Andrew
4. PLD-Grown Ferroelectric Oxide Nanometric Patterning using Ultrathin Twist Bonded Silicon Substrates. Pignolet, Alain
5. Metal Nanoparticles for Photonic Applications. Ritcey, Anna
6. A Molecular Electronics Test Platform for the Development of an Integrated Hybrid CMOS/Molecular Electronics Technology. Savaria, Yvon

### **Projets en Nanobiotechnologie/Nanopharmaceutique**

---

1. Influence of Composition and Processing Parameters on Size, Stability and Efficiency of Chitosan-based Nanoparticles for Gene Delivery. Responsable: Buschmann, Michael
2. Novel Non-viral Polymeric Nanoparticles for Gene Therapy and Tissue Engineering. Responsable: Fernandes, Julio
3. Gold Nanoparticles and Biological Matrices. Responsable: Lennox, R. Bruce
4. Towards Single Molecule Detection Devices Using Peptide Nanostructures As Molecular Transduction Systems. Responsable: Voyer, Normand
5. Controlled surface nanopatterning in tissue engineering for bone and cartilage. Responsable: Wertheimer, Michael R

## **Projet en Auto-assemblage/Patterning**

---

1. Patterning Surfaces on a Nanometric Scale by Molecular Self-Assembly.  
Responsable: Sleiman, Hanadi

En février 2003, Samson Bélaire Deloitte et Touche en collaboration avec NanoQuébec, a présenté un rapport faisant le portrait des activités de nanotechnologies au Québec. Dans ce rapport, on peut répertorier 25 petites entreprises ou entreprises en démarrage opérant dans le domaine des nanotechnologies. En moyenne, ces entreprises entretiennent deux projets de recherche avec 10 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

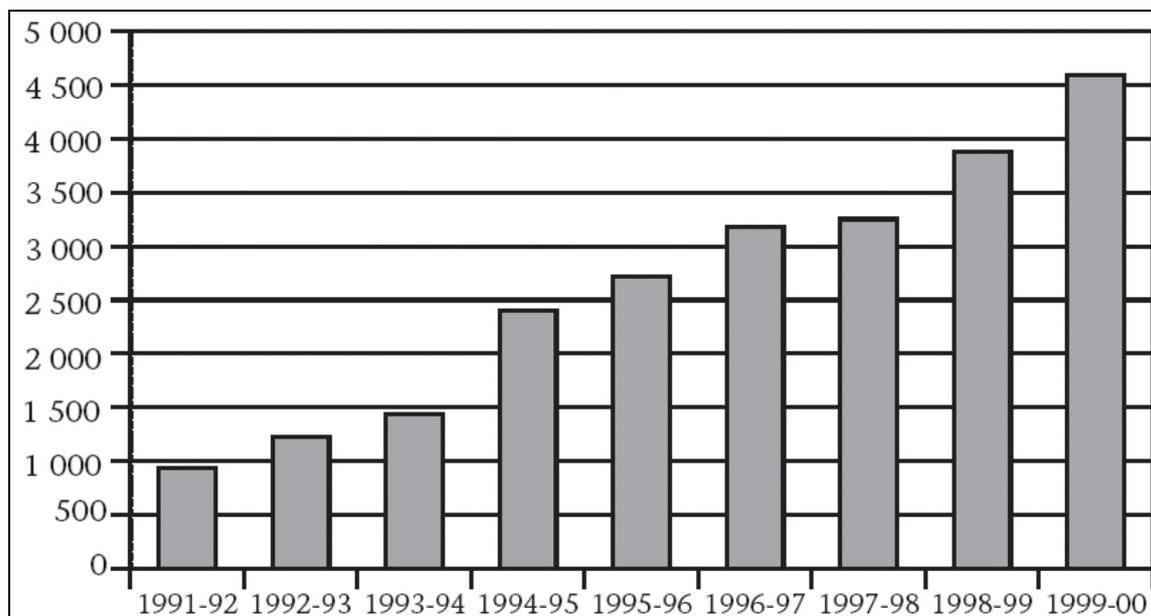
En date du rapport, 172 chercheurs ont été identifiés au Québec, dans neuf centres universitaires (McGill, Concordia, UdeM, Polytechnique, UQAM, UQTR, Sherbrooke, Laval et l'INRS). Sur les 172 chercheurs, 73 sont actifs en nanotechnologie dans la majeure partie de leurs activités. Pour ce qui est des 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 20 entreprises actives au Québec ayant de grands centres de recherche, seules Hydro-Québec et Alcan mènent des activités de recherches en nanotechnologie.

### 3.3.2 CRSNG

Une autre source de financement est le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie. Le CRSNG appuie financièrement plus de 17700 étudiants universitaires et stagiaires postdoctoraux, ainsi que plus de 9 600 professeurs d'université chaque année. 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 tableau suivant indiquant les montants (en milliers de dollars) des subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies.



<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, 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.

## 4 Évaluation des risques

Il 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 minimiser ces risques, 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 sera 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, 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

### 4.1 Risques liés aux nanomatériaux

#### 4.1.1 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. Ceci réduit donc le poids de la carrosserie par exemple, donc la consommation d'énergie, donc la pollution qui en résulte. Par contre, il faut soulever aussi le point que le recyclage des polymères est plus ardu que celui du métal qu'on est en train de remplacer. Il faudra alors se doter de nouvelles méthodes de recyclage de ces nouveaux nanomatériaux avant de les lancer sur le marché.

### 4.1.2 Entreposage

Toujours en raison de l'augmentation de la surface des particules qui entraîne une plus grande réactivité, l'entreposage des nanoparticules exige des soins particuliers. Elles peuvent comme on l'a vu précédemment 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.

### 4.1.3 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 :

- Entre autres, nous pouvons citer 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, sont en train de collaborer avec des toxicologues, biologistes, des ingénieurs biomédicaux pour évaluer les effets biologiques imprévus de ces nanomatériaux. Selon Colvin, la grande difficulté de l'étude vient du fait que la grande diversité de nanomatériaux existant déjà sur le marché fait en sorte 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 nous pourrons réglementer dans le domaine des nanotechnologies et éviter les effets pervers de ces technologies.

On sait déjà que sous certaines conditions, les nanoparticules peuvent pénétrer l'intérieur des cellules. Sans avoir de données précises, 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, peuvent certainement 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.

Un problème qu'entrevoit Colvin est l'état d'avancement de la nanoscience par rapport aux pressions sociales qui vont 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 du *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 dans les vaisseaux sanguins du cerveau, ce qui sert de bouclier contre les toxines dans la circulation sanguine. 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 telles que celles de Parkinson ou 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 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 dans le cerveau.

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

Trois constatations majeures peuvent ressortir :

- premièrement la toxicité des nanoparticules varie beaucoup d'un type à l'autre en fonction de leurs propriétés intrinsèques, ce qui complexifie l'étude toxicologique;
- deuxièmement les études dans ce domaine se sont intéressées aux effets dans des milieux cellulaires restreints et il va être très difficile de prévoir les effets sur des organismes complexes tel que le corps humain
- 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 dans l'air. L'inhalation est donc le moyen le plus répandu d'être exposé aux nanoparticules. Ensuite, elles pourraient donc se retrouver dans le système respiratoire et éventuellement finir dans les organes internes tels que le foie ou encore les systèmes nerveux central et cardiovasculaire. Mais à ce jour, il demeure encore beaucoup d'inconnues par rapport aux effets des nanoparticules à ces endroits.

**Günter Oberdörster**, professeur de toxicologie à l'*Université de Rochester* (N.Y.), a étudié les effets des particules dans l'air sur la santé (en milieu extérieur ou de travail). Il en est arrivé à la conclusion que les particules ultrafines (dont la taille est inférieure à 100nm) sont plus susceptibles d'entraîner des dommages inflammatoires aux poumons que les plus grosses. Dans un de ses études, le professeur Oberdörster et ses collègues ont découvert que les particules de polytetrafluoroéthylène (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 toxiques de PTFE contenant des particules de taille avoisinant 18 nm. Parmi ces rats, 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 toxiques. 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 telle que celle reliée aux automobiles et qu'on aurait peut-être plus à craindre de ces technologies « bas de gamme » plutôt que de la Haute technologie qui produit les fameuses nanoparticules.

Par contre, 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. Un des problèmes majeurs pour cet objectif est le coût trop élevé d'une étude des effets toxiques sur l'humain, on doit donc trouver de nouvelles voies. Lam a donc décidé d'étudier les effets toxiques des SWNTs (Single-Walled NanoTubes), des particules de « carbone black », et de quartz sur des souris de laboratoires. Le groupe de recherche a constitué deux groupes de souris; la santé des premières sera évaluée après 7 jours et celle des dernières après 90 jours d'observation.

Les résultats de l'étude ont donné les conclusions suivantes : Résultat: le carbone black donne des effets pathologiques mineurs, de fortes doses de quartz (0.5mg/souris) ont produit des effets moyens à modérés, et les essais avec les SWNT ont donné de microscopiques nodules appelés « granulomas », lésions qui se sont empirés avec le groupe des 90 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. Lam conclut donc que si les nanotubes atteignent les poumons, ils seront 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 introduit dans la trachée de rats.

- Ils ont examiné leurs poumons après 24h, 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 24h, 15% des rats ayant reçu de fortes doses de nanotubes (5mg 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 vois 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 exposés au quartz ont révélé une réponse inflammatoire soutenue et dépendant de la dose administrée, accompagnée d'une toxicité cellulaire. Les autres sujets n'ont pas montrée 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 questionner 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 toutes ces incertitudes, il est d'un commun accord qu'il serait judicieux de mener une étude complète sur l'inhalation de nanotubes par des rats en laboratoire.

## 4.2 Éthique

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 des nanotechnologies à long terme, même si on reconnaît l'importance du fait que certaines questions doivent être posées dès maintenant. Selon Mr 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; et 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.

## 5 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 que celles-ci opèrent à des dimensions nanométriques où la matière que l'on manipule présente de nouvelles propriétés jusqu'alors inconnues. Par ailleurs, le succès de 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 nanotechnologies 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 effet, en agissant sur la taille des particules composant les matériaux conventionnels, on est capable d'en améliorer les propriétés mécaniques et ce sans le besoin d'expliquer les principes physiques à la base de l'apparition de ces propriétés.

En nanoélectronique, les limites de miniaturisation que connaîtront bientôt les techniques conventionnelles de photolithographie seront comblées par une série d'alternatives, certaines plus prometteuse 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 du vivant et ainsi repousser 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 et sur ce plan 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, c'est celui du National Institute for Nanotechnology, situé en Alberta. Au Québec, le réseau universitaire québécois NanoQuébec a été créé. Ce réseau a été créé par Valorisation Recherche Québec dans le but de se doter d'un programme concerté de recherche dans ce domaine en émergence.

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 minimiser ces risques, en rapport avec 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 le marché des nanomatériaux pourra mettre en circulation des matériaux aux propriétés

avantageuses (économie d'énergie par exemple) mais dont le contre-coup serait l'absence de techniques de recyclage testées et approuvées. La production et l'entreposage des nouveaux matériaux est aussi sujet à risques étant donné la réactivité accrue de ceux-ci. Dans le domaine de la santé, quelques études ont été menées. Les risques pour la santé 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 liés aux nanomatériaux. La grande difficulté de ce genre d'étude vient du fait que la grande diversité de nanomatériaux existant déjà sur le marché fait en sorte qu'il n'y aura pas de réponse unique à la question d'évaluation des risques. Des tests ont 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 encore beaucoup de recherche à faire dans ce domaine.

La politique intégrée de produits (PIP) est une nouvelle politique publique qui vise, ou est adaptée à l'amélioration continue de la performance environnementale des produits et services dans un contexte de cycle de vie. Son principal objectif est d'améliorer la performance environnementale, en minimisant les dommages environnementaux causés par les produits ou services tout au long de leur cycle de vie, à savoir la conception, la fabrication, l'assemblage, le marketing, la distribution ou le 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. Cette structure se base sur la participation active des parties intéressées, travaillant avec le marché, afin d'inciter les entreprises à offrir des produits et des services qui exercent le moins d'influence possible sur l'environnement et qui utilisent peu de ressources naturelles durant toutes les phases de leur vie, stimuler la demande des consommateurs pour des produits plus écologiques, et utiliser le mécanisme de fixation des prix pour créer des débouchés pour des produits plus respectueux de l'environnement.

La production de nouveaux produits devrait être basée sur une approche holistique, tenant compte du cycle de vie du produit ou du procédé. Par conséquent, l'évaluation de cycle de vie est considérée comme la notion fondamentale pour mettre en application cette politique. Cette notion imprègne chaque aspect de l'approche de la PIP. Ceci signifie que des aspects environnementaux devraient être considérés dans toute la totalité du cycle d'un produit, du berceau à la tombe. De cette façon, une mesure appropriée peut être prise à n'importe quelle étape de la résolution de problème.

Examinés avec la perspective d'une évaluation de cycle de vie, la nanomanufacture et les nanoproduits peuvent présenter des impacts positifs et négatifs. L'analyse de cycle de vie (ACV) peut donner l'information utile d'évaluer globalement l'impact environnemental d'un produit ou d'un procédé. Cette information, en combinaison avec les données de l'évaluation des risques et l'évaluation socio-économique, devrait créer la base pour une discussion sur les objectifs de la politique. Les nanoparticules peuvent provoquer un effet nuisible à l'environnement pendant leur fabrication, leur utilisation et leur élimination. Leur production peut impliquer l'implantation d'une industrie lourde et sophistiquée, ce qui suppose consommation et déchets en énergie et matériaux. Avec cet important bond

technologique, il faudrait assurer le recyclage du vieil équipement et l'acquisition de nouveaux outils. Les industries auront besoin d'outils spécifiques pour incorporer les nanotechnologies. Pour ces raisons, et ceci est un des principaux points de notre étude, il est très important d'effectuer une ACV complète des nanoproduits et de leurs procédés. Cette affirmation donne naissance à la question suivante : la méthodologie d'analyse de cycle de vie est-elle prête à évaluer une technologie si particulière ?

En considérant les dimensions et les incertitudes reliées à la production et l'utilisation des nanoproduits, une attention particulière devrait être portée à la détermination des objectifs de l'étude, à la limitation des frontières du système, aux aspects négligeables et aux prévisions à long terme. Une difficulté majeure est reliée à la quantification et le suivi des nanomatériaux. Ce sont là des questions critiques à considérer en développant une évaluation de cycle de vie complète. Également, il y a des préoccupations concernant les potentiels effets secondaires à long terme des nanotechnologies et leur fiabilité. En raison de la récente émergence des nanosciences, il n'y a aucune étude concluante sur les risques et dangers directement liés à eux. Le risque est un point qui ne devrait pas être négligé et devrait être incorporé dans les ACVs.

En bref, les nanotechnologies sont une innovation radicale qui touchera tous les aspects de la vie économique et qui pourrait aider à tracer le chemin vers le développement durable. Cependant, il est nécessaire d'améliorer les mécanismes d'analyse, particulièrement la méthodologie d'analyse de cycle de vie des produits issus de procédés complexes de production et dont les dimensions les rendent très difficiles à retracer.

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

## RÉFÉRENCES :

- *Demain le nanomonde, Voyage au cœur du minuscule*, Jean-Louis Pautrat, Éditions Fayard, le temps des sciences, 2002
- *"Les nanotechnologies, la maîtrise de l'infiniment petit"*, avis publié par le Conseil de la Science et de la Technologie, 2001
- <http://www.nanoquebec.ca>
- <http://www.albanynanotech.org/>
- *"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, par Dr John M Taylor, Juin 2002. Disponible sur <http://www.dti.gov.uk/innovation/nanotechnologyreport.pdf>
- *"Nanoscale Iron Could Help Cleanse the Environment"*, NSF (National Science Foundation) Press Release 03-94, Sept 3, 2003.  
[www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm](http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0394.htm)
- M.C. Roco, Senior Advisor for Nanotechnology, National Science Foundation, *"International Strategy for nanotechnology Research and Development"*
- Samson Belair Deloitte & Touche, « Portrait des activités de nanotechnologies au Québec », Février 2003
- Ron Dagani, *"Nanomaterials : Safe or unsafe?"*, Science & Technology, April 28, 2003
- <http://www.chem.agilent.com> : Agilent 2100 Bionalyzer
- *"Is nanotechnology dangerous?"*, Robert F Service, Science, Washington, 24 Nov 2000
- *"Nanoscale Electronics"*; Mitch Jacoby; C&EN; September 30, 2002; Vol. 80, Num. 39
- <http://www.nano.gov> : National nanotechnology Initiative
- <http://www.raeng.org.uk/> : Royal Academy of Engineering
- [http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/information/fiche5\\_2.htm](http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/information/fiche5_2.htm)  
Cycle de vie d'un produit