

Conseil de la science et de la technologie

# Aperçu de la recherche sur les nanotechnologies

Document d'information

Daniel Lebeau

Juin 2001

L'image apparaissant sur la page couverture est un corail quantique qui a été réalisé en 1993 et qui est constitué de 48 atomes de fer sur une surface de cuivre.

Cette photographie est une gracieuseté du laboratoire IBM-Almaden situé à San Jose en Californie. On peut accéder au site internet du laboratoire à l'adresse suivante :

<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html#corral>

Conseil de la science et de la technologie  
1200, route de l'Église, 3<sup>e</sup> étage, bureau 3.45  
Sainte-Foy (Québec) G1V 4Z2  
Téléphone : (418) 644-1165  
Télécopieur : (418) 646-0920

Ce document est aussi disponible sur le site Web du Conseil de la science et de la technologie

<http://www.cst.gouv.qc.ca>

© Gouvernement du Québec  
Dépôt légal 2001

Bibliothèque nationale du Québec

ISBN : 2-550-37794-X

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. DIFFUSION DES NANOTECHNOLOGIES ET DOMAINES D'APPLICATIONS ....</b>	<b>5</b>
<b>3. LES NANOMATÉRIAUX.....</b>	<b>10</b>
3.1 Méthodes de production, d'entreposage et d'assemblage des nanoparticules .....	11
3.2 Des exemples de recherches et d'applications des nanomatériaux.....	14
3.3 Les fullerènes et les nanotubes de carbone .....	20
<b>4. LA NANOÉLECTRONIQUE.....</b>	<b>24</b>
4.1 La photolithographie optique conventionnelle.....	24
4.2 La lithographie par rayons X.....	25
4.3 Sematech et la carte technologique à venir .....	27
4.5 La lithographie aux ultraviolets extrêmes .....	28
4.6 La lithographie par faisceaux d'électrons.....	28
4.7 De nouvelles avenues de recherche révolutionnaires.....	31
4.8 L'électronique moléculaire .....	32
4.9 Les dispositifs nanoélectroniques à l'état solide.....	35
<b>5. LA NANOBIOTECHNOLOGIE.....</b>	<b>40</b>
5.1 Senseurs chimiques et biosenseurs.....	41
5.2 Des nanobiotechnologies permettant de déjouer le système immunitaire .....	43
5.3 Un système pour séparer plus rapidement les fragments d'ADN.....	44
5.4 La biomimétique ou l'auto-assemblage de la matière .....	45
<b>6. LES INSTRUMENTS, LA MODÉLISATION ET LA SIMULATION NÉCESSAIRES AUX NANOTECHNOLOGIES.....</b>	<b>46</b>
6.1 Le microscope STM .....	47
6.2 Le microscope AFM.....	48
6.3 Le Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM) .....	49
6.4 Applications prochaines .....	52
6.5 La modélisation et la simulation .....	53

## AVANT-PROPOS

Le présent document expose l'état des connaissances les plus à jour dans le monde en matière de recherche sur les nanotechnologies. L'introduction définit les concepts de nanoscience et de nanotechnologies, retrace leur origine et souligne leur importance grandissante en recherche. Les trois sections suivantes présentent les principaux secteurs de recherche, en les regroupant en fonction des trois grands domaines d'application que sont : les nanomatériaux, la nanoélectronique et la nanobiotechnologie. Enfin, la dernière section inclut une description des instruments spécialisés qui ont été développés pour soutenir la recherche.

Ce document se veut en fait un texte d'accompagnement à l'avis du Conseil de la science et de la technologie intitulé « *Les nanotechnologies. La maîtrise de l'infiniment petit* », qui paraît simultanément et est disponible dans le site web du Conseil. Il en reprend l'introduction et le premier chapitre mais fournit une information beaucoup plus détaillée, souvent inédite. Il est donc conçu à des fins plus pédagogiques que l'avis et est destiné aux étudiantes et étudiants de niveau collégial ou universitaire, mais aussi à tout lecteur peu familier avec le sujet et désireux de comprendre la nature des travaux en cours, certains des fondements scientifiques en cause, de même que les retombées technologiques possibles. La présentation est aussi vulgarisée que possible, malgré un sujet pourtant très spécialisé et donc potentiellement rébarbatif. Le lecteur qui aura déjà pris connaissance de l'avis ne devra pas se surprendre de trouver plusieurs passages identiques aux deux textes, le premier étant construit à partir d'extraits du second.

Nous souhaitons que la lecture de ce texte soit aussi instructive que possible. Comme il s'agit d'une première publication de cette nature au Conseil, ceux et celles qui souhaitent formuler des commentaires sur son utilité, la qualité de son contenu, sa structure ou sa facture sont invités à s'adresser par courrier électronique à Mme Suzanne D'Annunzio, secrétaire générale : **Suzanne.DAnnunzio@cst.gouv.qc.ca.**

# 1. Introduction<sup>1</sup>

Le rapport du National Science and Technology Council sur les nanotechnologies définit celles-ci comme étant la création et l'utilisation de matériaux, d'instruments et de systèmes portant sur la matière de l'ordre de 1 à 100 nanomètres, donc au niveau des atomes, des molécules et des structures supramoléculaires<sup>2</sup>. Un nanomètre (nm) est une unité de mesure qui correspond à un milliardième de mètre (soit  $10^{-9}$  mètre) ou un millionième de millimètre. Pour mieux apprécier la dimension d'un nanomètre, pensons que la taille des atomes se situe aux environs de 0,1 à 0,4 nanomètre, qu'une molécule d'ADN mesure 2 nm de large (mais mesure 10 mètres de long), qu'un ribosome mesure environ 30 nm, qu'un virus mesure entre 10 et 100 nm, alors que l'épaisseur d'un cheveu humain se situe entre 50 000 nm et 100 000 nm. Le terme nanotechnologie fut introduit pour la première fois par Norio Tanigushi en 1974, mais il fut vraiment popularisé par K. Eric Drexler dans les années 1980 lorsque celui-ci utilisa le terme de manufacture moléculaire. Cependant, le premier scientifique à avoir avancé l'idée qu'il serait bientôt possible à l'homme de transformer la matière au niveau atomique fut Richard Feynman. Dans un discours visionnaire devenu depuis célèbre et prononcé en décembre 1959 devant l'American Physical Society, Feynman envisageait qu'il serait un jour pensable de faire tenir tout le contenu de l'encyclopédie Britannica sur une tête d'épingle et qu'il serait possible de réorganiser la matière atome par atome<sup>3</sup>.

La définition du National Science and Technology Council est certes très utile, mais elle masque le fait qu'il n'y a pas unanimité en ce moment autour de la définition même des nanotechnologies. En effet, les chercheurs tant au Québec qu'ailleurs dans le monde qui s'intéressent aux nanotechnologies ne s'entendent pas toujours sur l'objet des recherches en nanotechnologies. Il semble qu'aucune rencontre internationale portant sur les nanotechnologies ne se tient sans que

---

<sup>1</sup> Les documents suivants furent notamment utilisés dans la production de ce rapport : National Science and Technology Council, *National Nanotechnology Initiative : Leading to the Next Industrial Revolution*, Washington, février 2000; National Science and Technology Council, *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*; National Science and Technology Council, *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report*, septembre 1999. World Technology Evaluation Center, *R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States*, janvier 1998. Ces documents sont disponibles sur le site Web <http://www.nano.gov>. Voir également Netherlands Study Center for Technology Trends, *Nanotechnology, Towards a Molecular Construction Kit*, Arthur ten Wolde (ed.), STT Report 60, 1998.

<sup>2</sup> National Science and Technology Council, *Nanotechnology Research Directions : IWGN Workshop Report*, op. cit.

<sup>3</sup> Le texte est disponible à l'adresse Web <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.

cette question ne soit soulevée. À l'intérieur même du comité de travail formé pour produire l'avis sur les nanotechnologies, plusieurs discussions ont eu lieu sur ce que devraient inclure ou ne pas inclure les recherches sur les nanotechnologies. Il ressort de ces discussions qu'il est important de ne pas définir de façon trop large les nanotechnologies; plusieurs chimistes, biologistes et physiciens pourraient alors situer leur travail – à tort – dans le champ des nanotechnologies. À l'opposé, il ne faut pas davantage définir les nanotechnologies de façon trop restrictive, car autrement très peu de chercheurs dans le monde seraient reconnus comme y effectuant des recherches. Le problème tient au fait que les chimistes, les physiciens et les biologistes travaillent en quelque sorte à une échelle nanométrique depuis déjà quelque temps, le plus souvent sur le plan théorique mais également sur le plan pratique. Par exemple, dans le cas des biologistes, plusieurs des phénomènes qu'ils étudient (ADN, virus, interactions entre une cellule et son environnement, etc.) se situent au niveau nanométrique. Le cas des physiciens est encore plus patent : plusieurs d'entre eux étudient la matière et effectuent des manipulations à l'échelle atomique depuis plus de cinquante ans, particulièrement depuis la maîtrise de l'énergie nucléaire. Les chimistes travaillent également avec des molécules au niveau nanométrique depuis plusieurs décennies.

Les définitions de nanoscience et de nanotechnologie utilisées dans ce rapport découlent d'un ensemble de discussions et de consultations menées auprès de chercheurs québécois actifs dans ces secteurs.

Ainsi, la nanoscience est le domaine portant sur l'étude des phénomènes observés dans des structures et systèmes :

- (1) dont la taille est de quelques nanomètres sur au moins une dimension de l'espace, et
- (2) possédant des propriétés qui découlent spécifiquement de cette taille nanométrique.

La nanotechnologie est quant à elle le domaine qui s'intéresse aux applications de ces phénomènes. La condition (2) permet de distinguer les activités nano de certains travaux de recherche qui se font depuis longtemps, par exemple en biologie ou en chimie macromoléculaire. Cette condition fait également en sorte que, par exemple, les travaux de miniaturisation des transistors, sur lesquels se base une large part du développement actuel de la microélectronique, ne répondent pas à notre définition des nanotechnologies même si la taille de certaines parties de ces transistors est nanométrique. Ceci s'explique du fait que ces

transistors fonctionnent selon un principe classique, utilisé depuis très longtemps, qui n'aborde pas spécifiquement les effets particuliers se manifestant aux échelles nanométriques.

Il est tout de même possible de circonscrire sous d'autres points de vue ce qui différencie les recherches et les applications sur les nanotechnologies des recherches plus traditionnelles. D'abord, les recherches sur les nanotechnologies sont avant tout multidisciplinaires. On assiste en fait à une véritable convergence entre les différentes sciences physiques. Le biologiste doit travailler avec des physiciens et des chimistes pour bien comprendre les phénomènes biologiques au niveau nanométrique, et avec des ingénieurs s'il veut mettre au point des appareils capables de manipuler la matière biologique, de la caractériser, etc. Le biologiste doit également recourir aux mathématiciens et aux informaticiens pour effectuer des simulations par ordinateur (avec des systèmes d'équations représentant les interactions entre les atomes) et pour vraiment comprendre, sur le plan théorique, ce qui se produit lors de ses expérimentations. C'est d'ailleurs là un aspect important du développement des nanotechnologies que cette interaction constante entre l'expérimentation et les simulations théoriques. Il faut par contre noter que la science a toujours progressé de cette manière, c'est-à-dire en faisant alterner les expérimentations et l'élaboration de la théorie.

Ce qui a donné leur véritable envol aux nanotechnologies est la création au début des années 1980 d'instruments comme le Scanning Tunneling Microscope (STM) par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, chercheurs au laboratoire d'IBM à Zurich. Ces deux chercheurs se sont d'ailleurs partagé le prix Nobel de physique en 1986 pour cette découverte. La mise au point de ce microscope a eu un effet très grand sur l'ensemble de la communauté scientifique, en particulier auprès des chimistes et des physiciens. En a découlé la création d'autres instruments aux fonctions sensiblement analogues. Pour la première fois, les scientifiques ont ainsi eu la possibilité non seulement de voir la matière au niveau des atomes, mais également de manipuler la matière de façon précise, atome par atome. Cette possibilité de manipuler la matière au niveau atomique est certainement ce qui distingue le plus facilement les nanotechnologies. D'ailleurs, une interprétation très restrictive des nanotechnologies limiterait les nanotechnologies à la construction de particules, de molécules, à partir d'atomes individuels. En fait, si on limitait les nanotechnologies à une telle définition, il n'y aurait pratiquement pas de recherches qui seraient effectuées sur les nanotechnologies.

Une autre distinction qui revient souvent lorsqu'il est question de nanotechnologies est celle qui oppose les approches *top-down* et *bottom-up*. Dans l'approche *bottom-up* typique, on assemble la matière atome par atome pour former des particules ou des molécules qui sont par la suite intégrés dans des systèmes plus grands. L'approche *top-down* procède à l'inverse. On

part d'un matériau solide, puis on le découpe, on le transforme, etc., à l'échelle nanométrique. Le plus bel exemple de cette dernière approche est celui de la lithographie, utilisée pour tracer des circuits électroniques. On prévoit d'ailleurs que la lithographie atteindra l'échelle des 40 nm à 100 nm au cours des dix prochaines années. Certains pourraient s'opposer à ce que l'approche *top-down* soit comprise comme faisant partie des nanotechnologies étant donné que les techniques employées sont connues et ont été développées pour travailler dans des ordres de grandeur de plusieurs ou de quelques centaines de nanomètres. Ce serait trancher trop rapidement. En effet, l'approche *top-down* va bientôt permettre d'atteindre le niveau nanométrique, soit un niveau inférieur à 100 nm. De plus, il existe une tendance certaine à combiner dans les mêmes centres de recherche l'approche *top-down* avec l'approche *bottom-up*. En effet, le fait de créer entièrement de nouvelles molécules en manipulant des atomes pris individuellement représente un défi énorme qu'on mettra quelques décennies à relever. Par conséquent, les applications les plus proches cherchent plutôt à combiner l'intégration d'éléments conçus au niveau nanométrique en utilisant l'approche *bottom-up* avec des appareils fabriqués selon l'approche *top-down* (par exemple la lithographie) et qui peuvent avoir des dimensions de quelques centaines de nanomètres. Selon notre définition de nanoscience-nanotechnologie donnée plus haut, la méthode de fabrication n'est pas un élément de nature à distinguer ce qui est " nano " de ce qui ne l'est pas. Notre définition est centrée sur le produit lui-même (structure ou système nanométrique) et sur ses propriétés, ce qui encourage la mise au point de combinaisons, fort porteuses à notre sens sur le plan des innovations, de plusieurs méthodes ou approches de fabrication pour développer de nouveaux nanomatériaux.

Ce qui rend si importantes les nanotechnologies est le fait qu'à l'échelle nanométrique (surtout de l'ordre de quelques nanomètres seulement), les matériaux et les systèmes peuvent révéler des caractéristiques complètement nouvelles qui ont pour effet d'améliorer sensiblement leurs propriétés, de même que les phénomènes et les processus physiques, chimiques et biologiques qui leur sont associés. En effet, les propriétés des matériaux nanométriques peuvent différer sensiblement de celles d'un matériau solide massif (c'est-à-dire dont les dimensions sont beaucoup plus grandes que quelques nanomètres). Il s'ensuit que les propriétés de la matière au niveau nanométrique ne peuvent être prédites à partir de ce qu'on a observé au niveau de la matière solide à grande échelle. Il est donc absolument nécessaire d'effectuer des recherches sur la matière au niveau nanométrique en recourant, en alternance, à des expérimentations puis à des simulations théoriques pour comprendre vraiment comment se comportent les matériaux à l'échelle nanométrique. Par exemple, les recherches ont clairement démontré que les matériaux conçus et assemblés au niveau nanotechnologique sont à la fois plus résistants et plus flexibles qu'un matériau solide traditionnel. De même, les propriétés

thermiques, électriques, magnétiques et optiques des matériaux nanométriques diffèrent sensiblement de celles du matériau solide traditionnel. Ainsi, les nanoparticules et les nanocouches ont un ratio surface sur volume extrêmement élevé, de sorte que leur utilisation dans des matériaux composites, dans le stockage d'énergie ou dans les processus chimiques s'avère idéale. Un autre exemple est celui de médicaments qu'on pourrait insérer dans le corps humain sous forme de nanoparticules et qui pourraient être ainsi plus efficaces. Les avantages sont évidents sur le plan des semi-conducteurs, puisqu'il sera possible d'utiliser les effets quantiques se manifestant de manière prédominante à l'échelle nanométrique pour construire de nouvelles classes de dispositifs. Ces dispositifs seraient beaucoup plus rapides et moins énergivores et leur principe de fonctionnement serait complètement différent de ce qu'on connaît actuellement.

Les chercheurs doivent donc être en mesure de contrôler et de manipuler la matière au niveau nanométrique, de la caractériser (déterminer ses propriétés, sa distribution spatiale, ses sensibilités chimiques, etc.) et, enfin, de comprendre comment on peut exploiter ces nouvelles propriétés pour construire de nouvelles nanostructures utiles. Certes, au fur et à mesure que les connaissances augmenteront dans ce domaine, on devra s'attendre à des applications de plus en plus nombreuses, mais presque tout reste à faire sur le plan scientifique.

## **2. Diffusion des nanotechnologies et domaines d'applications**

C'est probablement la publication en 1986 de l'ouvrage *The Engines of Creation*<sup>4</sup> qui a contribué le plus fortement à la diffusion du terme nanotechnologies dans le grand public. Son auteur, K. Eric Drexler, y a exposé ses idées sur les nanotechnologies et, en particulier, sur la capacité de celles-ci à révolutionner la totalité des modes de production actuels. Dans les années qui ont suivi, les premières conférences internationales sur les nanotechnologies se sont tenues aux États-Unis. En 1990, à l'initiative de l'English Institute of Physics, a débuté la publication du premier journal scientifique consacré aux nanotechnologies. Plusieurs autres ont suivi au cours des années 1990. Pendant ce temps, de grandes compagnies comme IBM ont consacré des montants substantiels à la recherche dans ce domaine alors qu'on assistait à la création des premières entreprises vouées exclusivement à la production et à la commercialisation de produits issus de recherches sur les nanotechnologies. Ces entreprises furent souvent l'aboutissement de recherches conduites dans des laboratoires gouvernementaux américains ou encore le fait de professeurs travaillant dans les universités américaines.

---

<sup>4</sup> Disponible également en français sous le titre *Les engins créateurs* sur le site Web <http://www.foresight.org>.

Les États-Unis ne furent pas les seuls actifs dans le domaine des nanotechnologies : la plupart des pays d'Europe ainsi que le Japon le furent également beaucoup.

### **K. Eric Drexler: un apôtre des nanotechnologies**

K. Eric Drexler est certainement la personne dont le nom a été jusqu'à récemment le plus associé aux nanotechnologies. Drexler, qui a travaillé plusieurs années au centre de recherche de Xerox à Palo Alto en Californie, a fondé l'institut Foresight dans le but de promouvoir les nanotechnologies. Selon sa vision des nanotechnologies, il sera possible de monter pratiquement n'importe quel objet au moyen d'assembleurs (sorte de nanorobots) qui vont construire ces objets en les assemblant atome par atome. Ces assembleurs seraient dotés de nano-ordinateurs et conserveraient donc en mémoire le modèle de ce qu'ils doivent assembler. Il serait également possible de communiquer avec ces assembleurs pour modifier leur programme et leur faire assembler un objet différent, par exemple, ou simplement cesser d'en produire. Comme la production au niveau atomique prendrait passablement de temps (on a calculé qu'assembler une feuille de papier en insérant un million d'atomes à la seconde prendrait plus de 13 milliards d'années!)<sup>5</sup>, il serait nécessaire que les assembleurs se reproduisent entre eux et qu'ils travaillent en parallèle. Avec des milliards d'assembleurs fonctionnant en parallèle, Drexler pense qu'il serait par exemple possible de fabriquer une automobile en quelques heures seulement. L'opération serait donc plus efficace que les procédés actuels et ne produirait à peu près pas de pollution.

La production moléculaire ressemblerait ainsi davantage à la production de logiciels qu'au système manufacturier actuel. Il suffirait de fabriquer le premier exemplaire d'un assembleur et des programmes logiciels nécessaires à sa reproduction. Par la suite, une fois le nombre d'assembleurs suffisant, il suffirait de reprogrammer ceux-ci pour qu'ils se mettent à fabriquer un produit précis. On obtiendrait ainsi des copies à l'infini de l'objet en question. Le recours aux assembleurs mettrait fin à tous les processus actuels de production, qui nécessitent de laborieuses transformations, très coûteuses, énergivores et, de plus, polluantes. En somme, selon la vision de Drexler, ce serait l'abondance sur Terre, il n'y aurait plus de conflits pour le contrôle des ressources, ni de pollution. En somme, l'humanité pourrait enfin atteindre le bonheur!

Les idées de Drexler ont connu une vaste diffusion et ont le mérite, de l'avis même de plusieurs scientifiques sérieux travaillant sur les nanotechnologies, d'avoir suscité un grand intérêt dans plusieurs milieux liés aux nanotechnologies. Cependant, ces mêmes scientifiques reconnaissent que la vision de Drexler est totalement utopique et plusieurs doutent même qu'elle se réalise jamais. En effet, selon eux, la production moléculaire au moyen d'assembleurs se heurterait à la même difficulté que celle rencontrée par les systèmes biologiques vivants (qui sont en fait des manufactures moléculaires), à savoir l'accès à des matières premières. De la même façon que les plantes ont besoin de sol, d'eau, de fertilisants, etc., pour se reproduire, la question se pose de savoir comment on alimenterait ces nanorobots en matières premières.

Parmi les scientifiques, les programmeurs ont été les plus fascinés par les idées de Drexler. Cela tient sans doute au fait qu'ils sont en mesure de produire des pièces de nanorobots sur papier et de prouver (toujours sur papier) que leur fabrication ne viole aucune loi physique connue et que, par conséquent, il sera un jour possible d'y parvenir. L'ensemble des scientifiques travaillant dans le domaine des nanotechnologies ont pris discrètement leurs distances par rapport aux idées de Drexler. Certains se montrent toutefois plus virulents et soutiennent que les idées de Drexler sont totalement farfelues. Selon eux, le fait de diffuser dans le public l'image de chercheurs qui rêvent et qui ont perdu tout contact avec la réalité a même nui au développement des nanotechnologies. Quoi qu'il en soit, il semble bien que Drexler sera de plus en plus laissé pour compte dans les années à venir, à mesure que les nanotechnologies favoriseront les percées scientifiques et la création de nouveaux produits somme toute assez banals comparativement aux rêves de Drexler.

Source: " Nanotechnology : The Hope and the Hype ", *Technology Review*, mars-avril 1999.

---

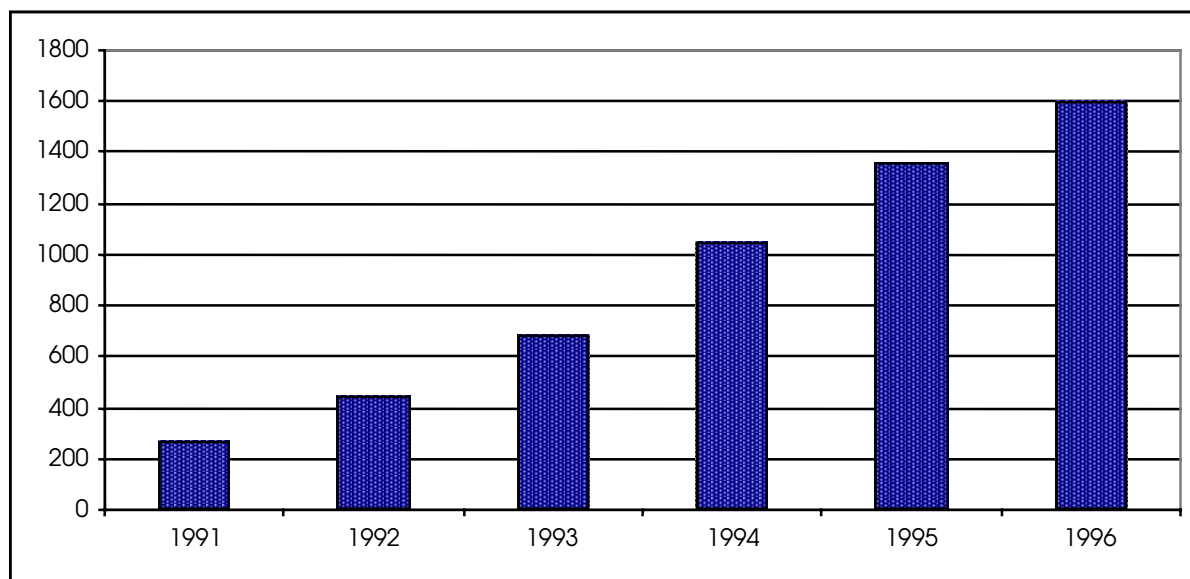
<sup>5</sup> Mohamed Chaker, *Les Nanotechnologies : de la manipulation des atomes aux matériaux et aux machines nanostructurées*, présentation au colloque Sciences et technologies : des visées d'avenir, organisé par le Conseil de la science et de la technologie dans le cadre du 68e Congrès de l'ACFAS, 17 mai 2000.

Comme en témoigne le graphique 1, on a assisté à une véritable explosion de la recherche sur les nanotechnologies au cours des années 1990. De deux articles parus en 1988, on est passé à 274 en 1991, puis à 1 047 en 1994 et à 1 607 en 1996. Cette tendance s'est maintenue au cours des années suivantes.

Le nombre de conférences portant sur les nanotechnologies qui se tiennent maintenant chaque mois est impressionnant ; par exemple, pour les seuls mois de novembre et de décembre 2000, respectivement, 12 et 10 conférences internationales se sont déroulées dans des pays aussi divers que les États-Unis, la France, la Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse.

Graphique 1

**Nombre d'articles portant sur les nanotechnologies dans les revues scientifiques**



Source: M. Meyer et O. Persson, " Nanotechnology-Interdisciplinarity, Patterns of Collaboration and Differences in Application ", *Scientometrics*, vol. 42, n° 2, 1998, p. 195-205.

Il est évident que le contrôle de la matière au niveau atomique ne date pas d'hier, puisque les chimistes réussissent à manipuler la matière et à créer de nouvelles molécules depuis au moins une centaine d'années. La catalyse chimique est un exemple de " vieille " nanotechnologie qui a permis d'agir sur la matière au niveau du nanomètre. C'est grâce à la catalyse chimique que beaucoup des procédés nés au 20<sup>e</sup> siècle, tels le raffinage du pétrole, la création de nouveaux médicaments, la mise au point de polymères et de plastiques, la production de diamants synthétiques peu coûteux utilisés dans le forage et les outils de coupe industriels, etc., ont été mis au point. Les catalyseurs et produits obtenus ont été découverts essentiellement par essais et erreurs en chauffant et en cuisant des métaux, des céramiques, etc., puis en observant les effets de ces transformations sur les propriétés des produits. Aujourd'hui, grâce aux moyens techniques

dont on dispose, on réalise que les produits issus de ces manipulations chimiques sont en fait des nanostructures dont les propriétés découlent de leur configuration interatomique.

Les possibilités d'application des nanotechnologies sont pratiquement infinies et touchent tous les domaines technologiques et scientifiques ainsi que l'ensemble des secteurs industriels.

On s'entend actuellement pour dire que les nanotechnologies constitueront la troisième révolution technologique. En effet, la première a donné naissance à la révolution industrielle à la fin du 18<sup>e</sup> et au début du 19<sup>e</sup> siècle. L'homme a alors appris à maîtriser la matière au niveau millimétrique avec des inventions comme la machine à vapeur. La deuxième révolution technologique s'est faite au milieu du 20<sup>e</sup> siècle avec la microélectronique. L'homme fut alors en mesure de maîtriser la matière au niveau du micromètre (un millionième de mètre). La troisième révolution technologique se produira au 21<sup>e</sup> siècle, grâce aux nanotechnologies qui permettront à l'homme de contrôler la matière au niveau du milliardième de mètre, soit au niveau de l'atome.

Il y aurait plusieurs façons de faire état de l'avancement de la recherche sur les nanotechnologies. Nous avons choisi de réunir l'ensemble des recherches sous trois grands domaines, à savoir les nanomatériaux, la nanoélectronique et l'utilisation des nanotechnologies en biotechnologie. Cette classification, bien qu'elle soit arbitraire jusqu'à un certain point, a le grand mérite d'être simple et de regrouper la recherche dans des domaines qui sont connus et importants. Bien entendu, certains chevauchements sont inévitables; par exemple, les nanotubes de carbone seront traités avec les nanomatériaux alors qu'ils peuvent être utilisés également en nanoélectronique, tout comme certains nanomatériaux peuvent être employés en biotechnologie. Cependant, cette approche nous semble avantageuse, car elle permet d'éviter beaucoup de confusion, impression que l'on retient souvent à la lecture de certains documents d'étude sur les nanotechnologies.

## Domaines et exemples d'applications des nanotechnologies

- Industries automobile et aéronautique : matériaux plus légers, renforcés par des nanoparticules, pneus qui durent plus longtemps et qui sont recyclables, peinture extérieure sur laquelle la saleté n'a pas prise, plastiques ininflammables et peu coûteux, textiles et recouvrements qui se réparent d'eux-mêmes.
- Industries de l'électronique et des communications : enregistrement de données avec des médias utilisant les nanocouches et les points quantiques, écrans plats, technologie sans fil, nouveaux appareils et processus dans tout le domaine des technologies de l'information et des communications, des vitesses de traitement et des capacités d'enregistrement des millions de fois plus rapides et, de plus, moins coûteuses que les méthodes actuelles.
- Industries chimiques et des matériaux : catalyseurs qui augmentent l'efficacité énergétique des usines de transformation chimique et qui accroissent l'efficacité de la combustion des véhicules moteurs (ce qui va diminuer la pollution), outils de coupe extrêmement durs et résistants, fluides magnétiques intelligents pour les lubrifiants et les joints d'étanchéité.
- Industries pharmaceutiques, biotechnologiques et biomédicales : nouveaux médicaments basés sur des nanostructures, systèmes de diffusion des médicaments qui ciblent des endroits précis dans le corps, matériaux de remplacement biocompatibles avec les organes et les fluides humains, kits d'autodiagnostic pouvant être utilisés à domicile, senseurs pour des laboratoires qui tiennent sur une puce, matériaux pour la régénération des os et des tissus.
- Secteur manufacturier : ingénierie de précision pour la production de nouvelles générations de microscopes et d'instruments de mesure, de nouveaux processus et de nouveaux outils pour manipuler la matière au niveau atomique, nanopoudres incorporées dans des matériaux en vrac avec des propriétés spéciales telles que des senseurs qui détectent les bris imminents et des contrôles en mesure de corriger le problème, auto-assemblage de structures à partir de molécules, matériaux inspirés par la biologie, biostructures.
- Secteur de l'énergie : nouveaux types de batteries, photosynthèse artificielle permettant de produire de l'énergie de façon écologique, entreposage sécuritaire de l'hydrogène pour utilisation comme combustible propre, économies d'énergie résultant de l'utilisation de matériaux plus légers et de circuits plus petits.
- Exploration de l'espace : véhicules spatiaux plus légers, production et gestion plus efficace de l'énergie, systèmes robotiques très petits et efficaces.
- Environnement : membranes sélectives qui peuvent filtrer les contaminants ou encore le sel de l'eau, pièges nanostructurés pour enlever les polluants des rejets industriels, caractérisation des effets des nanostructures sur l'environnement, réductions importantes dans l'utilisation des matériaux et de l'énergie, réduction des sources de pollution, possibilités nouvelles pour le recyclage.
- Défense : détecteurs et correcteurs d'agents chimiques et biologiques, circuits électroniques beaucoup plus efficaces, matériaux et recouvrements nanostructurés beaucoup plus résistants, textiles légers et qui se réparent d'eux-mêmes, remplacement du sang, systèmes de surveillance miniaturisés.

Source : National Science and Technology Council, *Nanotechnology Research Directions : IWGN Workshop Report*, septembre 1999.

### 3. Les nanomatériaux<sup>6</sup>

Les nanomatériaux sont des matériaux qui sont constitués d'un assemblage de particules nanométriques, c'est-à-dire dont la taille est inférieure à 100 nm. Les matériaux traditionnels sont habituellement composés de particules de plusieurs centaines et, plus souvent, de plusieurs milliers de nanomètres, qu'on appelle des grains. Or, au début des années 1980, on s'est rendu compte que, lorsqu'on diminuait sensiblement la taille de ces grains, les propriétés du matériau changeaient de manière très marquée.

En effet, des matériaux assemblés à partir de nanoparticules sont beaucoup plus résistants et plus malléables (ductiles) que les matériaux ordinaires. Plus la taille des nanoparticules diminue, plus la résistance (dureté) du matériau augmente. Par exemple, un matériau formé de nanoparticules de cuivre de 50 nm est deux fois plus dur qu'un matériau ordinaire de cuivre; avec des nanoparticules de 15 nm le matériau est près de trois fois plus résistant, alors qu'il l'est cinq fois plus avec des nanoparticules de 6 nm. De plus, le matériau devient également plus ductile et donc plus difficile à briser sous l'effet d'un choc. Il y a toujours un arbitrage à faire entre la dureté d'un matériau et sa ductilité, c'est-à-dire que, lorsqu'on augmente la dureté d'un matériau, il devient toujours moins ductile. Or, des matériaux composés de nanoparticules peuvent être à la fois plus durs et plus ductiles qu'un matériau ordinaire. Des recherches sont encore nécessaires dans ce domaine, car les processus physiques qui expliquent ces phénomènes ne sont pas encore complètement compris. On pense généralement que la diminution de la taille des particules entraîne des modifications dans les liens atomiques (basés sur le partage des électrons) qui contribueraient à rendre les nanoparticules plus solides. Pour ce qui est de la ductilité plus grande, on estime que, les particules étant très petites, elles glisseraient mieux entre elles lorsque survient un début de fracture, un peu comme des grains de sable qui se déplacent sous l'effet d'un choc. C'est ainsi que les chercheurs ont réussi à obtenir des céramiques qui étaient à la fois plus dures et qui résistaient mieux aux chocs.

Une autre propriété très intéressante des nanoparticules est le fait que leur ratio surface-volume est beaucoup plus élevé que celui des plus grosses particules. Ceci s'avère très utile, par exemple dans le cas de catalyseurs qui peuvent ainsi absorber plus de matière. Ces catalyseurs à base de nanoparticules peuvent servir à de multiples usages, par exemple à mieux fractionner le pétrole. Certaines nanoparticules sont poreuses, donc utiles pour absorber des composants chimiques polluants ou encore pour entreposer l'hydrogène de façon sécuritaire.

---

<sup>6</sup> Pour une bonne vulgarisation des propriétés nouvelles des nanomatériaux, voir Richard W. Siegel, « Creating Nanophase Materials », *Scientific American*, décembre 1996.

### 3.1 Méthodes de production, d'entreposage et d'assemblage des nanoparticules

Il existe plusieurs méthodes pour produire des nanoparticules<sup>7</sup>. Certaines consistent à chauffer à un niveau très élevé un matériau, de sorte que les atomes s'évaporent, puis à refroidir ces atomes pour qu'ils s'agglomèrent en particules. Ces opérations, quoique simples en apparence, s'avèrent tout de même assez complexes dans la pratique, car il faut éviter une trop grande agglomération des atomes. De plus, il faut utiliser des gaz inertes, parfois fonctionner sous vide. D'autres méthodes sont basées sur la pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (pulvérisation cathodique) ou d'un faisceau laser intense (ablation laser).

Une première méthode consiste à chauffer un matériau (par exemple un métal) à une très haute température (par exemple jusqu'à 1 700 °C) dans une fournaise qui contient un gaz inerte, puis à transporter les atomes qui s'évaporent avec le flux de gaz inerte. Les atomes vont s'agglomérer en particules en se refroidissant à l'extérieur de la fournaise. Une deuxième méthode, celle de la pyrolyse au laser, emploie un gaz qui est chauffé très rapidement avec un laser infrarouge pour évaporer le matériau. L'avantage de cette méthode est que les murs de la chambre de combustion ne sont pas chauds, ce qui réduit les risques de contamination des nanoparticules. Une autre méthode emploie la chaleur dégagée par une flamme appliquée directement sur le produit, ce qui a pour inconvénient de risquer une contamination au carbone. Une autre encore utilise un plasma à 10 000 °C pour décomposer la matière. Enfin, une dernière méthode recourt au bombardement avec des ions<sup>8</sup> de gaz inertes, tels l'argon ou le krypton, ce qui produit l'éjection d'atomes et de particules. Cette méthode, qui exige une chambre fonctionnant sous vide avec une pression très faible, est employée régulièrement dans la synthèse de matériaux semiconducteurs. Bref, on réalise que, si les méthodes sont nombreuses, elles exigent toutes un appareillage relativement lourd, onéreux et complexe. C'est d'ailleurs l'un des grands défis associés aux nanomatériaux que d'en arriver à produire des nanoparticules de façon suffisamment économique pour être en mesure de rivaliser avec les matériaux traditionnels qui s'avèrent beaucoup moins coûteux pour le moment.

L'entreposage des nanoparticules obtenues par divers moyens exige une certaine protection. En effet, puisque leur surface exposée est assez grande, ces nanoparticules sont très réactives et elles peuvent, par exemple, facilement s'oxyder. De plus, elles cherchent souvent à

---

<sup>7</sup> Pour un bon exposé des différentes méthodes, voir le Rapport 60 du STT, *op. cit.*

<sup>8</sup> Les ions sont des atomes chargés négativement ou positivement à la suite de l'ajout ou de la perte d'électrons. On se rappellera qu'un atome normal est neutre électriquement, puisque le nombre de charges positives (protons) du noyau chargé est égal au nombre de charges négatives (électrons).

s'agglomérer en plus grosses particules. Il faut soit les entreposer dans une atmosphère avec un gaz inerte ou les protéger en les enrobant avec une couche protectrice constituée de polymères ou de sels. Dans ce dernier cas, il faudra procéder à l'enlèvement de ces sels avant l'utilisation des particules. De plus, il arrive régulièrement que la taille des nanoparticules obtenues au moyen des méthodes présentées précédemment diffère. Dans certains cas, la taille peut varier de plusieurs nanomètres, de sorte qu'il faut procéder à des transformations supplémentaires pour obtenir des nanoparticules ayant sensiblement la même taille. On constate donc que la production et l'utilisation des nanoparticules sont complexes et peuvent être onéreuses.

L'utilisation des nanoparticules s'avère également assez délicate dans plusieurs cas. En effet, il faut soit chauffer ces nanoparticules et les presser pour obtenir un matériau, soit déposer ces nanoparticules sur une surface pour qu'elles forment une couche mince ou, encore, juxtaposer plusieurs couches minces de différentes nanoparticules. Procéder à ces diverses opérations – tout en maintenant l'intégrité des nanoparticules – pour obtenir un matériau qui possède les propriétés désirées n'est pas si simple. Les méthodes traditionnelles de déposition des particules peuvent parfois être employées. Par exemple, dans le cas d'une surface plane, on peut déposer les nanoparticules dissoutes dans un solvant sur la surface, puis soumettre celle-ci à une force centrifuge pour que le liquide se répartisse également sur l'ensemble de la surface. Dans le cas de surfaces accidentées, les méthodes traditionnelles de déposition électrophorétique qui consistent à tremper la surface à couvrir dans le liquide et à y faire passer un courant électrique peuvent être employées. L'intensité du courant va contrôler l'épaisseur de la couche déposée. Une méthode souvent utilisée est celle de la déposition par jet ou par aérosol. Lorsque le solvant s'évapore, la couche mince déposée durcit. Par contre, lorsqu'il faut appliquer plusieurs couches de nanoparticules différentes, l'opération se révèle plus lente et plus complexe, ce qui rend l'ensemble du processus assez coûteux.

Une méthode qui fait l'objet de beaucoup de recherches actuellement est l'auto-assemblage des particules. Il s'agit alors de mélanger les particules dans une substance colloïdale<sup>9</sup> et de créer les conditions pour que les différentes nanoparticules s'agglomèrent de la façon désirée. Plus facile à dire qu'à faire! La chimie colloïdale est une vieille branche de la chimie, de sorte qu'à première vue le fait de travailler avec des nanoparticules ne présente aucun problème. Malheureusement, la compréhension du comportement d'agglomération et de croissance des nanoparticules est un phénomène encore très mal compris. De plus, les techniques de filtration

---

<sup>9</sup> Une substance colloïdale est simplement la réunion de matières solides en suspension dans un liquide. Par exemple, le lait, l'encre et la peinture sont des substances colloïdales.

et de sédimentation sont encore plus difficiles à contrôler dans le cas des nanoparticules. En somme, il reste encore beaucoup de recherches à effectuer pour bien comprendre tous les phénomènes liés à la création, à l'entreposage, à la manipulation et à l'utilisation des nanoparticules.

### **La compagnie Nanophase : des précurseurs en nanomatériaux**

La compagnie Nanophase Technologies Corporation fut fondée en 1989 par Richard W. Siegel, un scientifique qui travaillait au Argonne National Laboratory. Nanophase fut en fait un essaimage (*spin-off*) des recherches effectuées à ce laboratoire, recherches financées par le département américain de l'énergie. Les fonds nécessaires au démarrage furent notamment fournis par la division de capital de risque du Argonne National Laboratory puis, par la suite, par des sociétés de capital de risque traditionnelles ainsi que par des investisseurs informels. Un prêt du département américain du commerce s'est également avéré important pour le financement de Nanophase. En 1998, Nanophase est devenue une entreprise publique avec l'émission d'actions sur les marchés financiers.

La technologie de base de Nanophase utilise un plasma pour chauffer un métal (fer, aluminium ou zinc), faisant en sorte que les atomes s'évaporent. Un gaz est employé pour refroidir les atomes et les amener à s'agglomérer en nanoparticules. Les atomes se mélangent également avec des atomes d'oxygène pour former des oxydes d'aluminium, de fer et de zinc. Une fois les nanoparticules formées et collectées, elles sont recouvertes de particules chimiques choisies selon les besoins. Par exemple, dans le cas de poudres qui seront agglomérées par chauffage et pression, une mince couche polymérique recouvre les nanoparticules pour empêcher que celles-ci ne s'agglomèrent de façon indésirable. La maîtrise de cette technologie a évolué au fil des ans. Ainsi, alors qu'au départ il en coûtait plusieurs milliers de dollars pour chaque gramme de nanoparticules produites, aujourd'hui celles-ci ne coûtent que quelques dollars le kilogramme. Leur coût demeure tout de même plus élevé que celui des matériaux traditionnels.

En dépit de la supériorité technique de ses produits, Nanophase a dû attendre plusieurs années avant que les utilisateurs acceptent de les employer. Les ventes de Nanophase ont été de 1,4 M\$ US en 1999 et on prévoit qu'elles atteindront 4,2 M\$ US en 2000, puis 12 M\$ US en 2001. Cependant, Nanophase n'enregistre toujours pas de profits, ayant subi une perte de 5,1 M\$ US en 1999. Les dirigeants prévoient que 2002 sera la première année où des profits seront dégagés, soit 13 ans après sa fondation! Nanophase attribue la difficulté des nanomatériaux à percer le marché au fait que le coût de ces nanomatériaux est plus élevé que celui des matériaux traditionnels et que, par conséquent, les utilisateurs résistent à les employer.

Les produits de Nanophase servent à de multiples applications. C'est ainsi que BASF utilise les oxydes de zinc de Nanophase dans des crèmes solaires. En effet, ces oxydes ont la propriété de bloquer les rayons UV. De même, le dioxyde de cérium est employé par les producteurs automobiles dans les convertisseurs catalytiques. En effet, l'utilisation d'oxyde de zinc se révèle plus économique que le palladium qui est utilisé actuellement dans les convertisseurs catalytiques. Autre exemple, l'entreprise Dr Scholl emploie les particules de zinc dans ses vaporisateurs pour chaussures parce qu'elles empêchent le vaporisateur de se bloquer par suite de l'agglomération de grosses particules. Les produits de Nanophase, qui favorisent une plus grande résistance à l'usure, sont également à l'étude pour utilisation dans les turbines de gaz et les moteurs d'avions. Il en est de même pour les plastiques. Sont également en cours d'évaluation des polymères qui résistent à l'abrasion, destinés aux senseurs utilisés dans le forage de puits de pétrole. Il en est de même de composants céramiques qui peuvent être employés dans la coulée en continu de l'acier. En fait, Nanophase est plutôt discrète sur les produits qu'elle développe, car elle travaille en partenariat avec des clients précis qui veulent conserver un avantage économique en ne diffusant pas le fait qu'ils utilisent les produits de Nanophase.

Source : Site Web de Nanophase, à l'adresse <http://www.nanophase.com>.

### **3.2 Des exemples de recherches et d'applications des nanomatériaux**

Les domaines de recherche et, par conséquent, d'application des nanomatériaux sont tellement vastes et distincts que la meilleure façon d'en donner une idée juste est de recourir à des exemples.

Un exemple de recherche et d'application est celui des composites polymères en vue de leur utilisation dans l'industrie automobile. Ce domaine de recherche reçoit beaucoup d'attention un peu partout dans le monde actuellement, puisqu'il est possible de renforcer les polymères classiques (plastiques) en leur incorporant des nanoparticules. Cet ajout a pour effet de rendre les polymères beaucoup plus résistants. En fait, il leur procure une résistance qui avoisine celle de l'acier, mais à une fraction seulement du poids, ce qui permet de réduire la consommation d'essence. De plus, ces polymères renforcés ne sont pas corrosifs. Des recherches sont en cours pour trouver des méthodes permettant une diffusion parfaite de ces nanoparticules dans les polymères ainsi qu'une réduction des coûts de production de tels composites. Dow Chemicals est actuellement associée à Magna International (une entreprise canadienne de pièces automobiles) dans un projet financé par le National Institute of Standard and Technology (NIST) pour mettre au point de tels nanocomposites. On prévoit que de tels matériaux seront également utilisés dans les secteurs de la construction, des appareils électroménagers, dans les appareils récréatifs, les appareils médicaux, etc.

Un autre exemple d'utilisation est la création d'alliages métalliques extrêmement résistants. Au cours de la dernière décennie, on a développé des composés sous forme d'alliages de tungstène-carbone-cobalt ou encore de titane-carbone-fer. Cependant, dans les méthodes traditionnelles de production, les grains les plus petits étaient de l'ordre de 300 nm. Or, on a réussi au cours des dernières années à mettre au point des méthodes de production basées sur les nanotechnologies qui permettent d'obtenir des particules de l'ordre de 30 à 40 nm. Des matériaux formés à partir de poudres métalliques tirées de ces alliages sont beaucoup plus durs et ils résistent mieux à l'usure que les alliages traditionnels. Des entreprises les utilisent actuellement pour fabriquer des mèches pour le forage du métal. Un exemple récent montre que les nanomatériaux font de plus en plus leur entrée sur les marchés. En effet, en avril 2000 la Marine américaine annonçait que, désormais, elle allait utiliser un alliage composé de nanoparticules de céramique aluminium-titane comme revêtement pour sa machinerie et son équipement. Ce nouveau revêtement fait preuve d'une endurance exceptionnelle, de beaucoup supérieure à celle des matériaux utilisés jusque-là. Ce revêtement a été mis au point conjointement par des universitaires de l'Université du Connecticut, de l'Université Rutgers, du

Stevens Institute of Technology ainsi que par des chercheurs et des ingénieurs de la Marine. La Marine anticipe par ailleurs un usage très intensif de ce nouveau revêtement dans les bateaux, les avions et les véhicules de l'armée de terre en raison de la capacité de ce revêtement à protéger les métaux de l'usure et de la corrosion, ce qui va diminuer le travail d'entretien de ces véhicules et appareils.

Les céramiques nanostructurées représentent actuellement un domaine de recherche fort actif. On a en effet constaté que les céramiques formées à partir de nanoparticules étaient plus résistantes et plus ductiles que les céramiques traditionnelles. Leurs applications sont fort nombreuses. On étudie ainsi la possibilité de faire des fenêtres " intelligentes " en leur incorporant des céramiques électrochimiques qui permettraient de mieux contrôler le chauffage et la climatisation des édifices par un meilleur contrôle des émissions de rayons infrarouges et visibles. De même, le recours à des céramiques électrochimiques dans la fabrication des batteries rechargeables entraînerait une amélioration de leur performance. L'emploi de senseurs de gaz chimiques basés sur des céramiques électrochimiques, qui permettrait d'améliorer la performance des moteurs à combustion, est aussi envisagé.

Un autre exemple d'utilisation des nanoparticules est l'ajout de nanoparticules d'argile de silicate à des plastiques. Le simple ajout de 2 à 6 % de ce composé à un plastique suffit pour réduire de façon marquée l'inflammabilité du plastique, de telle sorte que le feu prend difficilement et a tendance à s'éteindre de lui-même. De plus, l'ajout de tels nanocomposés aux plastiques n'a pas pour effet de diminuer les caractéristiques mécaniques des plastiques. Enfin, les plastiques résistent mieux à l'usure.

Les préoccupations environnementales concernant l'effet de serre font que l'emploi de l'hydrogène comme combustible automobile est envisagé de plus en plus sérieusement comme une mesure de rechange aux combustibles fossiles<sup>10</sup>. Le département américain de l'Énergie consacre annuellement environ 18 M\$ US à la seule recherche sur l'hydrogène. De plus, à peu près tous les constructeurs automobiles ont déjà mis ou vont bientôt mettre sur le marché des véhicules dont la source unique (ou encore combinée) d'énergie sera une batterie fonctionnant à l'hydrogène. Notons que c'est une entreprise canadienne, Ballard, à Vancouver, qui a mis au point la batterie la plus perfectionnée dans ce domaine. Deux grands problèmes limitent actuellement l'emploi de l'hydrogène dans les véhicules automobiles. Le premier est qu'il est plus

---

<sup>10</sup> Pour une bonne présentation de cette question et des recherches en cours, voir " Kicking the Habit : Petrol », *New Scientist*, 25 novembre 2000, « Fill'er up with Hydrogen », *Technology Review*, novembre-décembre 2000 ainsi que de nombreux documents sur le site Web du département américain de l'Énergie à l'adresse <http://www.eren.doe.gov>.

coûteux de produire de l'hydrogène que d'utiliser des combustibles classiques. Par exemple, le procédé d'électrolyse emploie plus d'énergie pour produire de l'hydrogène qu'il n'en génère. De plus, le fait d'utiliser des combustibles fossiles pour générer l'électricité ne fait que déplacer la source de pollution des villes et des autoroutes vers les centrales thermiques.

L'autre grande difficulté que soulève l'utilisation de l'hydrogène est son stockage. En effet, l'hydrogène étant extrêmement léger et facilement inflammable, son entreposage sécuritaire et économique représente un grand défi. La méthode de l'hydrogène liquide qui permet de stocker de grandes quantités d'énergie dans un volume restreint n'est pas pratique, car elle demande que l'hydrogène soit entreposé à  $-2530^{\circ}\text{C}$ . Cela peut convenir pour une navette spatiale, mais pas pour une automobile. Une autre méthode est l'emploi d'hydrogène comprimé dans des réservoirs, le plus souvent en métal et donc lourds et encombrants. C'est pourquoi la recherche au cours des dix dernières années a notamment été axée sur le développement d'hydrures métalliques tels que des alliages magnésium-nickel, magnésium-cuivre et fer-titanium. Ces alliages absorbent l'hydrogène et le libèrent lorsqu'ils sont chauffés. Les recherches ont montré que l'emploi de nanoparticules augmentait de façon significative la capacité d'absorption de ces alliages (en fait, celle-ci passe de 1 à 2 % à 5 à 7 %). Le Québec est d'ailleurs l'un des leaders mondiaux de la recherche dans ce domaine, grâce notamment à la chaire en hydrogène de l'Université McGill. Cependant, les recherches dans ce domaine doivent se poursuivre car, les métaux étant par essence lourds – combiné au fait qu'ils n'absorbent encore qu'environ 5 à 6 % de leur poids en hydrogène –, leur performance quant au poids et à l'espace nécessaire au stockage n'est guère supérieure à celle des réservoirs à hydrogène comprimé. Ces réservoirs sont cependant plus sécuritaires.

Une autre avenue de recherche s'est ouverte depuis quelques années, soit l'emploi de nanotubes de carbone, de fullerènes ou encore de nanofibres de carbone (voir plus loin pour un exposé détaillé des fullerènes et des nanotubes de carbone). Le grand avantage de ces éléments est qu'ils sont beaucoup plus légers que les hydrures métalliques, alors qu'ils ont une capacité d'absorption de l'hydrogène semblable, soit environ 6 % de leur poids, d'après les résultats des récentes recherches. Cette avenue de recherche semble donc fort prometteuse. Quant aux nanofibres de carbone, elles ont tendance à attirer fortement la vapeur d'eau, de sorte que jusqu'à maintenant leur utilisation s'avère possible uniquement dans un environnement très sec.

En somme, il existe à l'heure actuelle plusieurs avenues de recherche concurrentes en ce qui a trait à l'entreposage sécuritaire et économique de l'hydrogène pour son utilisation dans les véhicules automobiles. Les gouvernements et les entreprises vont devoir y consacrer des

montants substantiels au cours des années qui viennent. Il est évident également que le recours à des nanomatériaux est incontournable et très prometteur dans ce secteur de recherche.

Dans plusieurs secteurs industriels, les catalyseurs sont employés massivement pour fractionner les composants chimiques. C'est notamment le cas dans l'industrie du raffinage de pétrole. Une étude récente a démontré qu'aux États-Unis, durant la période 1930 à 1980, plus de 60 % des nouveaux produits et 90 % des nouveaux processus impliquaient des catalyseurs. Les catalyseurs sont à la base des industries chimiques et pétrochimiques, dont la valeur de la production était de 210 milliards de dollars US en 1990. De plus, pour la même année, la valeur totale des produits issus des catalyseurs (ou dont l'existence dépend ultimement des catalyseurs) était de 1000 milliards de dollars US aux États-Unis. Or, la plupart de ces catalyseurs sont en fait des structures nanométriques. Par exemple, les zéolites, qui sont des silicates d'aluminium, sont des nanostructures poreuses cristallines dont la taille des pores varie de 0,4 nm à 1,5 nm. Il s'ensuit que les zéolites peuvent servir à séparer diverses molécules chimiques selon la taille des molécules (qui diffère d'une molécule à l'autre). De plus, les zéolites ont la propriété de modifier l'acidité des matériaux zéolitiques. Ces deux caractéristiques des zéolites font que celles-ci s'avèrent très utiles comme catalyseurs, comme produits absorbants à des fins précises ainsi que dans les membranes. En 1992, des chercheurs de Mobil ont mis au point une nouvelle famille de zéolites (soit les M-41S) dont la taille des pores variait de 0,2 nm à 1 nm. C'était la première fois que des zéolites avaient des pores si fins. Cette découverte ouvre donc la porte à une multitude de nouvelles possibilités d'application des catalyseurs.

Le scientifique suisse Grätzel a développé une cellule solaire dite organique, basée sur des molécules de dioxyde de titane nanocristallines<sup>11</sup>. Les travaux menant à la découverte et à la mise au point de cette nouvelle technologie furent conduits au département de chimie de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. La cellule est dite organique, car elle utilise un colorant organique à base de complexes de ruthénium qui sont sensibles à la lumière. Ces colorants, reliés chimiquement au dioxyde de titane, éjectent un électron après excitation par la lumière. L'électron voyage de la cathode de dioxyde de titane jusqu'à une anode, ce qui produit de l'électricité. La nanostructure du dioxyde de titane est essentielle au fonctionnement et à l'efficacité du processus. En effet, c'est le fait que le matériel nanostructuré soit poreux et possède une surface interne énorme (une propriété des nanostructures) qui rend le processus efficace. La cellule Grätzel a une efficacité de 10 %, ce qui est tout à fait comparable aux cellules traditionnelles générant de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce

---

<sup>11</sup> Voir <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/solarcell.html>.

qui rend la cellule Grätzel intéressante, ce sont ses coûts de production, de beaucoup inférieurs à ceux d'une cellule traditionnelle. En effet, une étude réalisée par le Triangle Research Institute de Caroline du Nord prévoyait un coût de 0,60 \$ US/Wp contre 1,5 \$ US/Wp pour les cellules au silicium sous forme amorphe et 2,5 \$ US/Wp pour celles sous forme cristalline. Ce faible coût s'explique du fait que le dioxyde de titane soit produit abondamment et que les exigences techniques de fabrication de la cellule Grätzel soient relativement simples. De plus, le dioxyde de titane s'avère sécuritaire. Plusieurs contrats de collaboration avec des entreprises ont été conclus, notamment avec des entreprises allemandes, de sorte que la cellule Grätzel devrait être commercialisée sous peu, si ce n'est déjà fait. Elle se révélerait particulièrement utile pour les pays en voie de développement.

L'utilisation des nanomatériaux va accroître l'efficacité énergétique. En effet, les retombées des nanomatériaux à cet égard seront sans aucun doute fort nombreuses. Par exemple, des recherches effectuées au Argonne National Laboratory ont montré que l'emploi des nanomatériaux dans des aimants avait pour effet d'augmenter de façon appréciable le rendement énergétique de ces aimants, ce qui entraînera une amélioration sensible de l'efficacité des moteurs électriques. De plus, étant donné qu'à volume égal les nanomatériaux sont plus légers et plus résistants qu'un matériau traditionnel, cela favorisera des économies d'énergie.

Le tableau 1 rapporte de multiples utilisations possibles des nanomatériaux au cours des années à venir. La liste, et c'est peu dire, est fort impressionnante. Or, cette liste n'est pas exhaustive; tout au contraire, elle ne donne que des exemples d'applications qui viennent s'ajouter dans la plupart des cas aux exemples présentés précédemment. En somme, il faut considérer les applications possibles des nanomatériaux comme étant presque illimités, et ce, dans tous les secteurs d'activités économiques.

Tableau 1

Applications futures 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 fabriqués à base de matériaux superparamagnétiques
  - élimination des polluants dans les équipements de production d'électricité
- Industrie automobile
  - protection anticorrosion
  - élimination des polluants des convertisseurs catalytiques
  - automobiles hybrides employant des batteries qui utilisent des nanomatériaux
  - fenêtres intelligentes
  - efficacité énergétique accrue grâce à des bougies d'allumage basées sur des nanomatériaux et des revêtements qui résistent à la chaleur pour les cylindres
  - matériaux hybrides résistant aux éraflures
  - capteurs mesurant la performance du moteur
- Optique
  - plastiques résistant aux éraflures dans les lunettes, les lentilles, les viseurs
  - revêtements antibuée pour les vitres de voitures
  - verres teintés à faible coût
  - filtres optiques
- Capteurs hautement sensibles
  - capteurs pour différents gaz, tels que CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, et CH<sub>4</sub>
  - capteurs à rayons UV et capteurs optiques robustes comportant du silicium 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

Source : Netherlands Study Centre for Technology Trends, STT Report 60, *op. cit.*

De plus, comme l'ont montré divers exemples mentionnés dans ce rapport, on constate que l'emploi des nanomatériaux est déjà une réalité dans plusieurs secteurs d'activités économiques. D'ailleurs aux États-Unis en 1998, il existait plus de 50 entreprises actives en nanotechnologies. Le tableau 2 rapporte les ventes actuelles des entreprises dans les secteurs des particules et des revêtements nanostructurés aux États-Unis en 1996 ainsi que les ventes prévues en 2001.

Tableau 2

Ventes actuelles et prévues de matériaux nanostructurés aux États-Unis (M\$ US)

	1996	2001
Particules	41	148
Revêtements	1	6
Total	42	154

Source : Netherlands Study Centre for Technology Trends, STT Report 60, *op. cit.*

### 3.3 Les fullerènes et les nanotubes de carbone<sup>12</sup>

Une nouvelle molécule a fait son apparition en 1985, le fullerène, qui consiste en un assemblage d'atomes de carbone ayant la forme de ballon de soccer. La composition la plus courante de fullerènes comprend 60 atomes de carbone (appelons-la C<sub>60</sub>). L'atome de carbone a la propriété de s'unir facilement à plusieurs autres atomes par liaison d'électrons. D'ailleurs, la vie sur terre ne serait sans doute jamais apparue sans l'existence du carbone. Sous la forme de C<sub>60</sub>, le fullerène a des propriétés fort intéressantes. En 1991, le magazine *Science* décréta la C<sub>60</sub> molécule de l'année. Celle-ci fit à nouveau parler d'elle en 1996 lorsque Richard Smalley et Robert Curl de l'Université Rice du Texas ainsi que Harold Kroto de l'Université Sussex se sont partagé le prix Nobel de chimie pour leur découverte de cette molécule.

Si la fin des années 1980 et le début des années 1990 ont marqué l'apogée de la C<sub>60</sub>, ce sont dorénavant les nanotubes de carbone qui font l'objet d'intenses recherches, un peu partout dans le monde. Les nanotubes de carbone ont été découverts en 1991 par Sumio Iijima, de la compagnie japonaise NEC, au moyen d'un microscope électronique. Les chercheurs en avaient produit depuis de nombreuses années sans s'en rendre compte. Ce qui stimule les recherches sur les nanotubes de carbone est le fait qu'ils possèdent plusieurs propriétés fort intéressantes. Ainsi, les nanotubes de carbone sont très stables chimiquement, chaque atome de carbone étant lié à trois autres atomes de carbone. Les atomes forment un cylindre de quelques nanomètres seulement de circonférence, dont la longueur peut cependant atteindre plusieurs milliers de nanomètres. Les nanotubes de carbone peuvent même comporter plusieurs parois (cylindres). C'est d'ailleurs ce type qu'a obtenu Iijima en 1991. En 1993, Iijima et un

<sup>12</sup> Cette section s'inspire notamment de : Philip G. Collins et Phaedon Avouris, « Nanotubes for Electronics », *Scientific American*, décembre 2000 ; Alex Zettl, « Silence les nanotubes », *La Recherche*, n° 332, juin 2000 ; Boris I. Yakobson et Richard E. Smalley, « Des matériaux pour le troisième millénaire », *La Recherche*, n° 307, mars 1998. Pour une présentation plus technique, voir M.S. Dresselhaus *et al.*, « Nanotechnology in Carbon Materials », chapitre 7 de *Nanotechnology*, Gregory Timp (ed.), Springer-Verlag, New York, 1999.

chercheur d'un laboratoire d'IBM ont tous deux créé, chacun de leur côté, des nanotubes de carbone à une seule paroi. Ce sont ces nanotubes qui font présentement l'objet de la plupart des recherches. Le tableau 3 rapporte les propriétés des nanotubes de carbone.

Tableau 3

Propriétés des nanotubes de carbone

Propriété	Nanotubes avec une seule paroi	Par comparaison
Taille	0,6 à 1,8 nm de diamètre.	La lithographie par faisceaux d'électrons peut créer des lignes de 50 nm de largeur et quelques nm d'épaisseur.
Densité	1,33 à 1,4 gramme par centimètre cube.	L'aluminium a une densité de 2,7 g/cm <sup>3</sup> .
Résistance à la pression	45 milliards de pascals.	Les alliages d'acier très durs se brisent à 2 milliards de pascals.
Élasticité	Peuvent être pliés à des angles très prononcés puis redevenir droits par la suite sans aucun dommage.	Les métaux et les fibres de carbone se fracturent aux frontières des grains.
Capacité à transporter le courant électrique	Capacité estimée à un milliard d'ampères par centimètre carré.	Les fils de cuivre éclatent aux environs de 1 million A/cm <sup>2</sup> .
Émission par effet de champ électrique	Peuvent activer les phosphores avec une tension de 1 à 3 volts lorsque les électrodes sont espacées de 1000 nm.	Les pointes de molybdène nécessitent des champs de 50 à 100 V/μm et ont une durée de vie très limitée.
Transmission de la chaleur	On prédit qu'elle est aussi élevée que 6000 watts par mètre par kelvin à la température ambiante.	Les diamants purs transmettent 3 320 W/m-K.
Stabilité à la température	Stables jusqu'à 2800 °C sous vide, et à 750 °C à la température ambiante.	Les fils métalliques fondent à une température entre 600 et 1000 °C.
Coût	1 500 \$ US par gramme selon ce qu'a obtenu la compagnie BuckyUSA à Houston.	Le prix d'un gramme d'or était de 10 \$ US en octobre 2000.

Source : *Scientific American*, décembre 2000, *op. cit.*

Les propriétés des nanotubes de carbone sont tout à fait étonnantes. On a calculé par exemple qu'un câble entièrement fabriqué de nanotubes de carbone et mesurant 2,5 centimètres d'épaisseur (soit 10<sup>14</sup> nanotubes parallèles) serait une centaine de fois plus résistant qu'un câble d'acier de la même dimension tout en étant six fois plus léger. Mais un problème subsiste : les

nanotubes de carbone n'ont pas tendance à s'attacher entre eux, parce que pratiquement tous les électrons sont déjà liés à d'autres atomes de carbone. Chaque nanotube est extrêmement résistant, tant à la pression qu'à l'étirement, et résiste très bien à la chaleur. En revanche, les nanotubes n'ont pas tendance à s'agglomérer (un peu comme des spaghettis mouillés). Or, il est absolument nécessaire qu'ils tissent des liens très forts entre eux pour former un câble solide. En somme, des recherches sont nécessaires pour trouver une façon de lier entre eux les nanotubes. Richard Smalley prédisait que les nanotubes pourraient s'avérer fort utiles pour construire des ponts ou de gigantesques gratte-ciel antisismiques, des véhicules spatiaux, des avions et des véhicules terrestres à la fois légers et très résistants, de même que des gilets pare-balle légers. On réalise cependant que des recherches poussées sont nécessaires pour que ces prédictions se réalisent. Par exemple, deux voies sont actuellement explorées, notamment en Europe, pour permettre l'utilisation des nanotubes dans des matériaux. La première approche vise l'assemblage des nanotubes entre eux par des liaisons chimiques latérales pour produire un matériau carboné renforcé, alors que la deuxième approche s'intéresse à l'inclusion de nanotubes dans des métaux ou des polymères pour renforcer ces derniers.

Deux autres problèmes ont jusqu'ici limité l'emploi des nanotubes de carbone dans de nouvelles technologies. Le premier problème tient à la difficulté de manipuler des nanotubes, étant donné leur taille nanométrique. Par exemple, des chercheurs ont réussi à fabriquer des nanocircuits électroniques avec des nanotubes, mais ils ont dû les manipuler un à un avec des microscopes à force atomique : on est donc très loin de la production de masse ! L'autre problème est le fait que le coût des nanotubes est encore fort élevé, en fait 150 fois le prix actuel de l'or. Cependant, si la demande pour les nanotubes était forte, des techniques de production beaucoup moins coûteuses seraient sans aucun doute mises au point.

Malgré tout, il semble que des applications des nanotubes soient imminentes. En effet, en 1999 lors d'une conférence réunissant des spécialistes, la société coréenne Samsung a présenté un prototype d'écran plat dans lequel les nanotubes servent de source d'électrons. Cet écran est plus lumineux que les écrans actuels et, de plus, il consomme moins d'énergie. La rumeur veut que ce nouvel écran soit mis sur le marché en 2001. Ce serait l'un des premiers produits basés sur les nanotubes de carbone à être commercialisés.

Les nanotubes ayant une très forte propension à dissiper la chaleur, ils constituent, théoriquement du moins, un matériau de choix pour des applications électroniques. Combinés à des métaux ou à des plastiques, ils pourraient également être employés pour dissiper la

chaleur dans des moteurs, par exemple (ce qui permettrait l'emploi de plastiques, impossible actuellement).

Des fabricants de prothèses médicales espèrent mettre à profit la résistance mécanique et la stabilité thermique des nanotubes pour remplacer les métaux et les polymères employés actuellement dans la fabrication de prothèses. Toujours dans le domaine médical, il semble qu'actuellement la société Honeywell étudie la possibilité d'utiliser des nanotubes pour fabriquer des muscles artificiels.

Il serait également possible d'utiliser les nanotubes comme senseurs supersensibles. En effet, les nanotubes semiconducteurs voient leur résistance électrique changer radicalement lorsqu'on les expose à des composés alcalins, des gaz halogènes ou d'autres gaz, ce qui soulève la possibilité de développer des senseurs chimiques améliorés. On a vu précédemment que des études sont en cours quant au stockage d'hydrogène dans les nanotubes, puisque ceux-ci sont creux. Reliés à la pointe d'un microscope à sonde balayante, des nanotubes peuvent augmenter la résolution latérale du microscope par un facteur de dix ou plus, ce qui permet de mieux voir des protéines et autres grandes molécules. On accorde une probabilité élevée à cette utilisation des nanotubes.

Cependant, ce qui reçoit sans doute le plus d'attention des chercheurs est l'emploi des nanotubes en électronique. En effet, les nanotubes peuvent être soit conducteurs, soit semiconducteurs selon leur configuration géométrique, une propriété qui leur est exclusive par rapport aux autres matériaux (certains types de nanotubes deviennent même supraconducteurs à très basse température). Différents groupes de recherche ont réussi à créer des transistors à effet de champ (*field-effect transistor*, ou FET) en reliant deux électrodes métalliques avec des nanotubes. Les électrons circulent d'une électrode à l'autre à l'intérieur d'un nanotube qui peut fonctionner à température ambiante et démontre des propriétés semblables à celles des transistors à base de silicium. De plus, étant donné sa petite taille, le nanotube de carbone utilise beaucoup moins d'électricité. Des théoriciens ont prédit que des interrupteurs basés entièrement sur les nanotubes pourraient fonctionner à des vitesses d'un térahertz ou plus, soit 1000 fois plus rapidement que les processeurs actuellement disponibles. Cependant comme nous l'avons mentionné précédemment, le grand problème est de trouver des moyens de manipuler ces nanotubes efficacement ou, à tout le moins, de trouver une méthode efficace d'assemblage. Nous traiterons davantage de cette question dans la section suivante sur la nanoélectronique.

En somme, les nanotubes s'avèrent fort prometteurs pour l'avenir, mais ils exigeront des investissements considérables en recherche avant de donner lieu à la mise au point de

technologies. Il ne faut pas sous-estimer les efforts en recherche qui seront nécessaires pour que des produits commercialisables à base de nanotubes de carbone soient développés.

## **4. La nanoélectronique**

Les progrès immenses réalisés jusqu'ici dans l'augmentation de la puissance des ordinateurs sont dus essentiellement à la capacité d'installer des transistors de plus en plus petits sur une même surface. Vers le milieu des années 1960, Gordon Moore, un des fondateurs d'Intel, observait que le nombre de transistors que comportaient les circuits intégrés doublait environ tous les ans et il prédisait le maintien de cette tendance au moins jusqu'au milieu des années 1970. En fait, ce phénomène (maintenant connu sous le nom de *loi de Moore*) s'est poursuivi jusqu'à maintenant, les performances doublant aux 18 mois. Cependant, la miniaturisation des transistors associée à cette approche cause des problèmes de fabrication des circuits qui sont de plus en plus difficiles à surmonter.

Nous allons exposer dans un premier temps les différentes techniques en cours de développement pour poursuivre la miniaturisation des transistors. Nous verrons que les limites de ces techniques se situent à environ 20 ou 30 nm. Cette dimension correspond également à la taille où de nouveaux effets physiques (p. ex. les effets quantiques) viennent affecter fortement le fonctionnement des dispositifs traditionnels.

Par la suite, nous examinerons les recherches réalisées dans des entreprises ou des universités et qui impliquent un changement radical dans la façon de concevoir les ordinateurs. Ces nouveaux ordinateurs atteindraient des puissances de traitement et de stockage de beaucoup supérieures à celles des ordinateurs actuels.

### **4.1 La photolithographie optique conventionnelle**

La photolithographie optique conventionnelle est utilisée actuellement dans la fabrication des circuits intégrés. Elle consiste à fabriquer des motifs prédéfinis sur un substrat approprié (p. ex. une tranche de silicium) pour pouvoir modifier localement les propriétés de conduction de ce substrat (ce qui permettra de construire les transistors) ou encore pour déposer du métal à certains endroits (ce qui servira notamment à établir les interconnexions entre les transistors, et ainsi former le circuit intégré). Pour réaliser ces motifs, on dépose d'abord sur le substrat une couche de résine polymérique extrêmement mince. Il s'agit en fait d'une résine photosensible dont les propriétés sont modifiées lorsqu'on l'expose à un rayonnement ultraviolet (UV). On fait passer un faisceau de rayons UV au travers d'un masque comportant des zones transparentes disposées selon le motif souhaité. Un système optique approprié permet alors de projeter une

image réduite (par un facteur quatre ou cinq) de ce masque sur la couche de résine. Certaines parties de la résine subissent à ce moment l'exposition aux UV, alors que les autres restent vierges. À l'étape suivante, des produits chimiques appliqués sur la résine enlèvent la partie des polymères exposée à la lumière, laissant le substrat exposé à l'air dans ces régions. On peut ensuite soumettre les régions exposées à un bombardement d'ions ou, encore, y déposer du métal, par exemple. La répétition de telles étapes de fabrication selon un agencement précis permet de réaliser les structures complexes que constituent des circuits intégrés comme les microprocesseurs. La résolution de ce procédé de fabrication (ou, en d'autres mots, la largeur de la structure la plus fine qu'il soit possible d'atteindre) est déterminée essentiellement par la longueur d'onde de la lumière utilisée pour l'exposition de la résine. Par conséquent, pour fabriquer des transistors plus petits, et ainsi augmenter la performance des circuits, il est nécessaire de mettre au point des techniques utilisant de la lumière d'une longueur d'onde plus courte. La technologie de pointe emploie présentement la lumière située dans la partie du spectre électromagnétique qui correspond à l'ultraviolet lointain (longueur d'onde d'environ 200 nm). Les nouvelles technologies en cours de développement pour la production industrielle massive de circuit intégré visent l'utilisation de rayons correspondant à l'ultraviolet extrême (EUV) ou, encore, de rayons X. Un faisceau de particules, telles que des électrons, peut également être utilisé pour exposer une couche de résine sensible à ce type de rayonnement. Cette technologie, appelée lithographie par faisceau d'électrons (LFE), possède une variante, la lithographie par projection de faisceaux d'électrons (EPL), qui soulève un grand intérêt en ce qui concerne la fabrication de circuits complexes. Chacune de ces technologies possède des avantages et des inconvénients, que nous tenterons de résumer rapidement dans les paragraphes qui suivent.

## **4.2 La lithographie par rayons X**

Cette technologie est basée sur l'utilisation d'un rayonnement de très courte longueur d'onde (inférieure à 1 nm) et permet d'atteindre la limite de taille ultime prévue pour le fonctionnement de transistors au silicium, soit environ 25 nm. Une difficulté associée à l'utilisation des rayons X vient du fait qu'il n'existe pas de lentilles ou de miroirs utilisables pour réduire l'image d'un masque, comme en lithographie classique. Dans ce cas, le faisceau de rayons X traverse un masque et expose un substrat directement, sans passer au travers de lentilles. C'est donc dire que le masque doit avoir la même dimension que le produit final puisqu'il est reproduit directement sur le substrat sans diminution de la taille. Cela entraîne une difficulté de fabrication supérieure pour le masque, qui doit être réalisé dans un matériau absorbant suffisamment le rayonnement X. Pour fabriquer un circuit intégré, plusieurs masques doivent être utilisés, soit un pour chaque étape de fabrication (environ 40 au total, pour certains circuits). À chaque étape,

le masque doit être aligné avec la position occupée par le masque de l'étape précédente, ce qui exige une grande précision de positionnement. De plus, des sources de rayons X intenses (synchrotrons) doivent être utilisées pour mettre en œuvre cette technologie. Cependant, des chercheurs japonais ont récemment démontré que, malgré les difficultés qui lui sont inhérentes, la lithographie à rayons X comporterait un coût de fonctionnement inférieur à celui des technologies EUV et EPL pour la fabrication de circuits intégrés complexes.

IBM a fait figure de pionnier quant à l'utilisation industrielle de la lithographie par rayons X<sup>13</sup>. Après avoir travaillé durant plusieurs années seule à ce projet, IBM reconnaissait au milieu des années 1990 ne plus avoir les moyens de continuer ainsi. Lors de la rencontre organisée par Sematech à l'automne 1999 en vue de déterminer les technologies en lithographie ayant le plus de chances d'être utilisées à l'avenir, la majorité des 19 spécialistes invités se sont prononcés en faveur des lithographies EUV et EPL (voir plus loin). Cette décision a mis en péril l'avenir de la lithographie par rayons X, à tout le moins aux États-Unis. Or, il semble que les entreprises japonaises aient réussi à surmonter les principales difficultés inhérentes à cette dernière technologie, la rendant ainsi très compétitive par rapport aux lithographies EUV et EPL<sup>14</sup>. En 1996, l'Association des technologies électroniques super-avancées (ASET) fut créée au Japon. Cette association regroupe tous les fabricants de semi-conducteurs ainsi que les fabricants d'équipements pour la lithographie. Or, lors d'une rencontre organisée par l'ASET en 2000, il semble bien que la lithographie par rayons X soit ressortie comme étant en avance sur les autres technologies. Une collaboration entre Fujitsu, NTT et l'ASET aurait permis de démontrer la faisabilité de la lithographie par rayons X. Sumitomo Heavy Industries a développé un nouveau synchrotron, l'Aurora-S, qui serait beaucoup plus efficace et qui rendrait économiquement possible la lithographie par rayons X. Si ces informations sont exactes et si les producteurs japonais décident d'aller de l'avant avec cette technologie, cela donnerait plusieurs années d'avance aux fabricants japonais de semi-conducteurs. Cependant, il est possible que les producteurs japonais décident de s'aligner sur les décisions prises par les participants de Sematech en 1999 (soit de privilégier les lithographies EUV et EPL), plutôt que de s'aventurer seuls dans la lithographie par rayons X. Autrement dit, il est possible que des technologies inférieures l'emportent, ce qui arrive occasionnellement en technologie. Rappelons-nous la concurrence entre le Bêta et le VHS où le VHS a écrasé son concurrent bien que le Bêta fût techniquement supérieur, ou encore le système d'exploitation Windows qui a devancé celui destiné aux micro-

---

<sup>13</sup> Voir Gary Styx, « Toward "Point One" », *Scientific American*, février 1995.

<sup>14</sup> Voir Henry Smith, « Japan Could Dominate Industry with X-ray Lithography », *Semiconductor International*, février 2001.

ordinateurs Macintosh, alors qu'au départ le système d'exploitation des Mac était supérieur. Lorsque les différences entre technologies concurrentes ne sont pas trop prononcées, c'est souvent le nombre d'utilisateurs qui détermine le gagnant d'une course technologique et non la qualité intrinsèque de la technologie. En somme, les producteurs américains l'emporteraient uniquement grâce à la force de leur nombre.

À l'heure actuelle, il n'a pas été clairement établi que la lithographie par rayons X sera effectivement utilisée commercialement, que ce soit pour la fabrication de circuits intégrés au silicium, ou encore dans des niches plus spécifiques telles que les mémoires RAM magnétiques, les mémoires RAM ferroélectriques, l'optique intégrée et la nanophotonique. Cet exemple montre bien les difficultés énormes, les coûts élevés et les risques très grands associés au développement de nouvelles technologies aux incidences économiques majeures. Il révèle notamment la difficulté que représente la mise au point de procédés applicables à la fabrication de structures aussi petites et rentables économiquement. Enfin, il illustre l'absolue nécessité pour les entreprises de développer en consortium de telles technologies, qui nécessitent des investissements faramineux.

#### **4.3 Sematech et la carte technologique à venir<sup>15</sup>**

Sematech regroupe l'ensemble des fabricants d'équipements de fabrication de circuits intégrés (et en particulier les équipements de lithographie) ainsi que les grandes entreprises spécialisées en lithographie en vue d'effectuer de la recherche précompétitive, plus particulièrement dans le domaine de la lithographie<sup>16</sup>. Sematech joue un rôle très utile en conduisant elle-même des recherches de nature précompétitive ainsi qu'en diffusant largement auprès des entreprises et des chercheurs les plus récents développements dans le domaine de la lithographie. Sematech vise également, par des rencontres annuelles ou des conférences, à établir un consensus quant à la direction probable de la technologie dans les années à venir. Ainsi, lors d'une rencontre en septembre 2000, les principales entreprises en lithographie ont recommandé que l'ensemble des entreprises se concentrent sur le développement des technologies EPL et EUV. Le consensus est à l'effet que la lithographie optique pourra continuer d'être employée jusqu'à 100 nm. Pour les distances de 70 nm et 50 nm, les techniques EPL et EUV pourraient être utilisées. Pour les

---

<sup>15</sup> Voir le site Web de SEMATECH <http://www.sematech.org>.

<sup>16</sup> Pour en savoir davantage sur Sematech, voir Conseil de la science et de la technologie, *Le transfert de technologie vers les entreprises, L'expérience de différents pays*, janvier 2000. Disponible à <http://www.cst.gouv.qc.ca>.

distances de 35 nm, seule la technologie EUV pourrait l'être. Évidemment, cela tient compte des connaissances technologiques actuelles.

#### **4.5 La lithographie aux ultraviolets extrêmes<sup>17</sup>**

La lithographie aux ultraviolets extrêmes (EUV) est une technique de lithographie en cours de développement. Elle a la faveur de plusieurs fabricants et il semble bien qu'elle soit techniquement et économiquement réalisable au cours des années qui viennent. Pourtant, elle comporte d'importantes difficultés, qui découlent notamment du fait que les longueurs d'onde envisagées, soit de 1 nm à 40 nm, ne sont réfractées par aucun matériau connu, de sorte que les lentilles conventionnelles ne peuvent être employées. Il faut donc utiliser toute une série de miroirs optiques réfléchissants pour concentrer la lumière EUV. Cette dernière est générée par une source de plasma produite au moyen d'un laser. La surface des miroirs réfléchissants doit être totalement lisse. En fait, la hauteur de la surface ne peut différer que de quelques atomes seulement, autrement dit d'à peine un à deux nanomètres. Il semble que cela soit aussi exigeant que de vouloir niveler la distance entre New York et San Francisco en s'assurant qu'aucune dénivellation supérieure à 2,5 centimètres ne subsiste sur toute la longueur du parcours! En octobre 2000, Intel annonçait qu'elle allait de l'avant avec la lithographie EUV pour la fabrication de sa prochaine génération de puces. Intel avait formé un consortium avec Motorola, Micron, AMD et Infineon sur le plan du financement et du développement des masques. De plus, le consortium a fait appel à trois laboratoires du gouvernement fédéral (Lawrence Livermore, Sandia et Lawrence Berkeley) qui effectuent de la R-D fondamentale, en vue de recourir à leur expertise, à leurs équipements pour la conception et la fabrication d'appareils prototypes. Grâce à la lithographie EUV, Intel prévoit dessiner des circuits de 70 nm à des coûts semblables à ceux associés à la lithographie conventionnelle. La mise en production est prévue pour les années 2002 ou 2003.

On anticipe actuellement que la lithographie EUV permettra d'atteindre des circuits de seulement 35 nm.

#### **4.6 La lithographie par faisceaux d'électrons**

Il existe plusieurs variantes de cette technologie. Une approche bien connue consiste à utiliser le faisceau d'électrons d'un microscope électronique pour exposer une couche de résine selon un

---

<sup>17</sup> Voir le site Web d'Intel <http://www.intel.com/labs/index.htm>.

motif programmé électroniquement. Il suffit pour cela de contrôler le déplacement du faisceau d'électrons (cela peut se faire à l'aide d'un simple ordinateur personnel) pour exposer les régions voulues, ce qui évite l'utilisation de masque et rend cette technique très souple. Cette méthode comporte également une très haute résolution (jusqu'à 20 nm ou moins). Son désavantage principal réside dans sa lenteur pour la réalisation de circuits complexes. En effet, plutôt que d'exposer le circuit complet d'un seul coup (comme quand on éclaire à travers un masque), il faut ici écrire le motif ligne par ligne, ou point par point. Bien que des moyens soient envisagés pour pallier cette difficulté, par exemple la mise au point de systèmes dotés de plusieurs têtes d'écriture fonctionnant en parallèle, la relative lenteur de cette méthode la rend peu intéressante pour la fabrication massive de circuits tels que des microprocesseurs. Cette méthode est par contre particulièrement bien adaptée à la fabrication des masques nécessaires aux autres technologies de lithographie, ainsi qu'à la réalisation de prototypes de composants et circuits à des fins de recherche.

Différentes approches ont été adoptées par les grandes entreprises de fabrication de circuits intégrés pour combiner l'utilisation de masques avec la technique de faisceau électronique, de manière à augmenter le taux de production de circuits. On parle dans ce contexte de lithographie par projection de faisceaux d'électrons (EPL). Une avenue prometteuse est celle qu'ont empruntée les laboratoires Bell aux États-Unis, baptisée SCALPEL (pour Scattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography)<sup>18</sup>. Elle fonctionne de la manière suivante. Une source d'électrons semblable à celle utilisée dans les microscopes électroniques projette des électrons sur un masque composé d'une membrane et d'une couche comprenant les dessins à imprimer. La plupart des électrons passent à travers le masque. La technique repose essentiellement sur le fait que les électrons traversant la membrane sont dispersés fortement, alors que ceux traversant le dessin le sont peu. Par la suite, les électrons sont concentrés au moyen d'une lentille vers l'ouverture de l'appareil SCALPEL. Ce dernier ne laisse passer que les électrons alignés proprement, ce qui permet de créer le dessin sur une couche de résine préalablement déposée sur le substrat. Les électrons sont concentrés quand on les fait traverser une seconde lentille pour exposer certaines régions de la couche de résine. Le système de lentilles permet de réduire par un facteur de quatre les dessins du masque.

Les recherches ont débuté en 1989 aux laboratoires Bell et un premier prototype a été fabriqué au milieu des années 1990. Par la suite, Bell s'est associée à d'autres entreprises pour commercialiser cette technologie. De plus, un consortium d'entreprises regroupant notamment

---

<sup>18</sup> Voir *SCALPEL : A Projection Electron-Beam Approach to Sub-Optical Lithography*, Bell Laboratories, Lucent Technologies. Disponible sur le Web à l'adresse <http://www.bell-labs.com/project/SCALPEL>.

les fabricants de matériel lithographique a été formé pour accélérer le développement de l'équipement nécessaire. Ce consortium comprend notamment Samsung, Lucent Microelectronics, Texas Instruments et Motorola. Bell estime que cette technologie sera commercialisée en 2004-2005. Nikon et IBM travaillent conjointement à la conception d'outils pour la lithographie de type EPL. À l'exception des masques, les technologies développées sont semblables à celles de Bell. Des efforts sont déployés afin d'élaborer une technologie commune aux deux groupes. En effet, étant donné les coûts extrêmement élevés de développement et les risques non négligeables, les entreprises doivent absolument s'entendre sur des standards communs.

Avec la lithographie EPL, Bell estime pouvoir atteindre successivement 100 nm, 70 nm et 50 nm au cours des dix années qui viennent. Cela fait donc de la lithographie par faisceaux d'électrons un rival sérieux de la lithographie EUV. Pour ce qui est des coûts de cette technologie, ils se comparent favorablement, selon Bell, à ceux des technologies concurrentes. Cependant, de l'avis de certains observateurs, il n'est pas assuré que la lithographie EPL va réussir à s'imposer face à la lithographie EUV. En effet, pour être économiquement rentable, une technologie doit être adoptée par un très grand nombre de fabricants. Tout dépendra donc du choix qui s'imposera au plus grand nombre au départ. Il est possible que la première technologie disponible l'emporte simplement en prenant une longueur d'avance et devienne ainsi un standard auquel tous les fabricants adhéreront par crainte du risque.

Une fois de plus, on voit les risques immenses que doivent courir les entreprises pour développer des technologies nouvelles dans le domaine de la fabrication de circuits intégrés.

Les différentes approches que nous avons brièvement abordées dans cette section ne sont que quelques-unes des différentes technologies qui sont actuellement étudiées (ou expérimentées) partout dans le monde. En effet, des efforts importants de recherche sont actuellement déployés dans la plupart des pays européens ainsi qu'au Japon et même au Canada pour découvrir des technologies alternatives à la lithographie classique<sup>19</sup>. Il est aussi très important de réaliser que les techniques de lithographie ne servent pas qu'à fabriquer des microprocesseurs, mais également une large variété de composants, structures et circuits intégrés qui sont utilisés dans d'autres applications que les ordinateurs. On pense notamment aux télécommunications, aux capteurs de toute sorte, aux circuits de contrôle d'une multitude d'appareils et de machines

---

<sup>19</sup> Voir par exemple *Technology Roadmap for Nanoelectronics*, disponible sur le site Web de l'Institut de prospective technologique de Séville de la Commission européenne à l'adresse <http://www.jrc.es>

qui font partie de notre vie de tous les jours, tels que automobiles, appareils électroménagers, chaînes stéréo, etc.

#### **4.7 De nouvelles avenues de recherche révolutionnaires<sup>20</sup>**

Actuellement, plusieurs laboratoires universitaires, gouvernementaux, de même que des laboratoires de grandes entreprises comme IBM ou Hewlett Packard, mènent de nombreuses recherches afin de franchir la limite des 30 nm à laquelle se heurteront les différentes techniques de lithographie présentées précédemment et utilisées pour la fabrication de circuits en silicium. À des dimensions inférieures à 30 nm, différents effets physiques (effets quantiques) se manifestent de manière prédominante et affectent le fonctionnement des composants. Par exemple, les régions isolantes entre deux composants étant extrêmement fines, les électrons acquièrent une probabilité non négligeable de passer d'une région à l'autre par un effet quantique appelé effet tunnel. Les recherches sont très nombreuses pour explorer les possibilités d'utilisation de matériaux autres que le silicium, ou pour concevoir des composants et circuits fonctionnant sur un principe différent des circuits au silicium actuels (par exemple, des composants peuvent être conçus pour tirer profit des effets quantiques mentionnés plus haut). On peut distinguer deux grands domaines de recherche dans ce contexte : celui de l'électronique moléculaire et celui des dispositifs nanoélectroniques dits à l'état solide. Cette dernière catégorie regroupe plusieurs types de structures, par exemple les points quantiques, les dispositifs à effet tunnel résonant, les transistors à un seul électron et les fils quantiques.

En plus des limites physiques inhérentes à la miniaturisation des transistors, une autre raison va probablement fixer des limites concrètes à l'approche basée sur la miniaturisation des composants au silicium, à savoir le coût croissant de construction d'une usine de fabrication de circuits intégrés. Les coûts ont sans cesse augmenté au fil des ans, atteignant environ 1,5 milliard de dollars US présentement. Certains estiment qu'à ce rythme, en 2010, une usine de circuits au silicium coûtera entre 30 et 50 milliards de dollars US. Toute entreprise qui déciderait de construire ce type d'usine dans un contexte semblable verrait sa survie menacée advenant un échec ou des difficultés majeures dans le procédé de fabrication.

Les ordinateurs actuels peuvent effectuer des calculs 100 millions de fois plus rapidement que ne le faisait le premier ordinateur, l'ENIAC. Cependant, les prédictions théoriques de la physique

---

<sup>20</sup> Pour une excellente présentation vulgarisée des différentes avenues de recherche, voir M. Montemerlo, J. Love *et al.*, *Technologies and Designs for Electronics Nanocomputers*, Mitre, juillet 1996, disponible sur le site Web [http://www.mitre.org/technology/nanotech/list\\_of\\_articles.html](http://www.mitre.org/technology/nanotech/list_of_articles.html).

fondamentale montrent qu'il serait possible de multiplier leur capacité de calcul par un milliard, ce qui fait dire à certains que nous ne sommes pas encore vraiment entrés dans l'ère des ordinateurs. Des ordinateurs beaucoup plus puissants que les ordinateurs actuels favoriseraient le développement de l'intelligence artificielle ainsi que l'exploration plus rapide de nombreux champs scientifiques.

#### **4.8 L'électronique moléculaire**

Un domaine de recherche qui attire beaucoup l'attention actuellement est l'électronique moléculaire, car des résultats encourageants et fort prometteurs ont été obtenus récemment. Si les résultats attendus se concrétisent, il sera possible de construire des ordinateurs d'une façon totalement différente des techniques actuelles de lithographie.

Plusieurs chercheurs travaillent donc présentement à l'utilisation de molécules chimiques et biologiques comme composants des ordinateurs. Ces molécules serviraient notamment de transistors, le composant de base de tout ordinateur. En effet, des molécules pourraient servir d'interrupteurs au courant électrique. Par exemple, lorsqu'elles sont soumises à un courant électrique, les molécules changent de forme après absorption d'un électron, reprenant leur forme initiale après relâchement de l'électron. Autrement dit, les molécules pourraient représenter 0 ou 1 selon leur forme, ce qui est le fondement même d'un transistor et donc d'un ordinateur. L'utilisation d'une molécule comme transistor aurait pour avantage de diminuer grandement la taille des transistors, ce qui permettrait d'en installer un nombre beaucoup plus grand dans un même espace, de réduire la distance entre les transistors et d'accélérer par le fait même la vitesse de traitement des données. Des ordinateurs ainsi conçus pourraient possiblement fonctionner des milliers de fois plus rapidement que les ordinateurs actuels.

Plusieurs molécules sont à l'étude. Mentionnons la bactériorhodopsine<sup>21</sup>, une protéine bactérienne qui a déjà fait l'objet de recherches intensives (et possiblement d'applications) en Union soviétique. Les recherches réalisées depuis le milieu des années 1970 aux États-Unis ont permis de démontrer que la bactériorhodopsine change de forme lorsqu'elle est soumise à des rayons lumineux au moyen d'un laser. Il est possible de la ramener à son état initial en l'illuminant avec un laser d'une autre couleur. Le laser permet également de déterminer la forme de la bactériorhodopsine, ce qui permet de déterminer si la bactériorhodopsine prend la valeur 1 ou 0. On réalise que la bactériorhodopsine peut servir de composant à un ordinateur, puisqu'elle permet d'entreposer des données, qu'il est possible d'écrire et de lire et de modifier à

---

<sup>21</sup> Voir Robert R. Birge, Protein-Based Computers », *Scientific American*, mars 1995.

volonté. L'emploi de protéines semblables à la bactériorhodopsine augmenterait de façon extrêmement importante la capacité de stockage de données, puisque les protéines pourraient fonctionner dans trois dimensions contrairement aux disques optiques actuels qui ne fonctionnent qu'en deux dimensions. On pense que la capacité d'entreposage serait multipliée des centaines de fois. Les chercheurs pensent être en mesure d'utiliser les protéines comme la bactériorhodopsine qui serviraient de mémoire et qui seraient liées à des semi-conducteurs traditionnels pour former un ordinateur hybride.

D'autres recherches récentes effectuées à l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) ont permis de synthétiser une molécule agissant comme un commutateur. Les chercheurs de UCLA travaillent avec plusieurs sortes de molécules, dont les caténanes et les rotaxanes, qui peuvent être produites avec les moyens traditionnels de la chimie synthétique. Il serait donc possible de fabriquer des transistors, des commutateurs et des résistances de façon peu coûteuse. Les chercheurs espèrent qu'il sera un jour possible de créer des circuits en déposant les molécules sur une plaque de plastique, par exemple, pour que, par la suite, elles s'assemblent d'elles-mêmes et forment un réseau. Évidemment, un tel réseau comportera inévitablement des erreurs, contrairement aux puces fabriquées par la lithographie conventionnelle (du moins, dans ce cas, les quelques puces défectueuses sont rejetées lors du contrôle de la qualité). Par conséquent, de tels ordinateurs devraient pouvoir fonctionner avec des pièces défectueuses. Un ordinateur conçu par Hewlett Packard (HP), le Teramac<sup>22</sup>, le fait déjà : les trois quarts de ses 864 puces étaient défectueuses au moment de sa conception, ce qui représentait pas moins de 220 000 défauts ! Pourtant, le Teramac pouvait résoudre des problèmes 100 fois plus vite qu'un autre ordinateur. En effet, son architecture ouverte permettait à l'information de prendre plusieurs chemins différents pour atteindre son but. Il devient donc possible d'assembler des ordinateurs à partir de pièces nanométriques qui ne seraient pas toutes forcément identiques, ce qui en simplifie de beaucoup la fabrication.

Les chercheurs d'HP travaillent en collaboration avec des chercheurs de UCLA et ils espèrent être en mesure d'ici un an ou deux d'assembler chimiquement une mémoire à 16 bits, mémoire qui occuperait un espace de 100 nm sur 100 nm. Ils pensent ainsi augmenter par un facteur de mille la capacité de mémoire des ordinateurs. À long terme, le but poursuivi par HP est d'assembler un ordinateur entièrement avec des composants moléculaires. Les chercheurs d'HP ont bon espoir d'y arriver d'ici une dizaine d'années.

---

<sup>22</sup> Voir « Computing after Silicon », *Technology Review*, septembre-octobre 1999.

Un autre groupe travaille activement à la mise au point de molécules pouvant jouer le rôle de transistors et de composants d'ordinateurs<sup>23</sup>. Ce groupe est composé de deux équipes rattachées aux universités Yale au Connecticut et Rice au Texas. Les chercheurs ont ainsi mis au point une molécule de nitroamine de benzénithiol qui peut servir de conducteur. Cette molécule coincée entre deux électrodes d'or a pu retenir des électrons pendant une dizaine de minutes, ce qui est de beaucoup supérieur aux quelques millisecondes des mémoires actuelles des puces à base de silicium. Chaque fois que le courant était appliqué à la molécule, celle-ci se déformait et bloquait ainsi le passage du courant. Lorsque le courant cessait d'être appliqué à la molécule, celle-ci reprenait sa forme initiale et laissait à nouveau passer le courant. Autrement dit, cette molécule agit en partie comme un transistor traditionnel. Il reste cependant encore beaucoup de travail à faire pour que cette molécule serve effectivement de transistor. En effet, un transistor a besoin de trois terminaux, dont l'un contrôle le flux du courant entre les deux autres. Or, pour le moment, la molécule de nitroamine de benzénithiol n'a que deux terminaux. Surtout, il va falloir trouver des moyens de lier entre elles les molécules pour que l'information se transmette dans l'ensemble des molécules et qu'on puisse y accéder. C'est ainsi qu'il a été suggéré que des nanotubes de carbone pourraient remplir cette fonction de liaison. À leur tour, ces nanotubes de carbone pourraient être reliés à des circuits traditionnels du même type que ceux utilisés présentement. En somme, les défis à relever sont immenses et très stimulants. Il semble que les chercheurs de Yale et Rice y croient, puisqu'en novembre 1999 ils ont formé une entreprise, Molecular Electronics Corporation, dont le but est de développer et d'éventuellement commercialiser les résultats de leurs recherches. C'est la DARPA, un organisme relevant du département américain de la défense, qui a financé l'essentiel de leurs recherches depuis une dizaine d'années. Malgré le peu de résultats obtenus au cours des premières années, la DARPA a maintenu son financement.

C'est donc dire que le mode de fabrication des futurs ordinateurs différera entièrement des processus actuels. La fabrication des composants électroniques moléculaires ressemblera en effet davantage aux processus des compagnies pharmaceutiques. Les composants chimiques seront déposés sur un substrat et s'assembleront d'eux-mêmes. Le nombre d'opérations sera donc réduit de façon draconienne, puisqu'il faut actuellement plusieurs dizaines d'étapes de fabrication pour produire une puce au silicium. Par conséquent, non seulement les capacités de traitement et de mémoire de ces puces seront de beaucoup supérieures, mais leur coût de fabrication sera également très inférieur à ce qu'il est aujourd'hui. Les premières applications de l'électronique moléculaire se feront probablement dans le domaine de la mémoire moléculaire.

---

<sup>23</sup> Voir Mark A. Reed et James M. Tour, « Computing with Molecules », *Scientific American*, juin 2000, ainsi que Rick Overton, « Molecular Electronics Will Change Everything », *Wired*, juillet 2000.

Il faut souligner que dans plusieurs cas les développements en électronique moléculaire ont été plus rapides que ce que les chercheurs eux-mêmes anticipaient parfois. Il est certes toujours extrêmement risqué de faire des prédictions dans le domaine technologique, mais il semble fort probable qu'en 2025 certains types d'ordinateurs comprendront des composants moléculaires, qu'ils auront une puissance de traitement et de stockage des milliers de fois plus grande et que leur coût de fabrication sera soit identique, soit inférieur aux ordinateurs actuels.

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

Plusieurs équipes de chercheurs se sont penchées sur des mécanismes susceptibles de miniaturiser les transistors ou d'entreposer de l'information : nous allons décrire ici quelques-uns de ces mécanismes qui ont fait l'objet de plusieurs recherches, soit les dispositifs à effet tunnel résonnant, les points quantiques, les transistors à un seul électron et, enfin, les fils quantiques.

Les dispositifs à effet tunnel résonant (RTD) font l'objet de recherches depuis plusieurs années. Deux types de mécanismes furent proposés, soit les diodes à effet tunnel résonant et les transistors à effet tunnel résonant (RTT, qui utilisent les RTD). Le principe de fonctionnement d'un RTD est le suivant : un matériau semiconducteur donné, par exemple de l'arséniure de gallium (GaAs), est disposé de telle façon qu'une sorte d'île est créée entre la source et la sortie du courant. Le matériau de cette île est conducteur et il est entouré d'un alliage de GaAs et d'arséniure d'aluminium (AlAs) qui laisse moins facilement passer les électrons. La seule façon pour les électrons de traverser les deux passages qui isolent l'île est d'avoir un niveau d'énergie identique à celui des électrons sur l'île. Lorsque le niveau d'énergie des électrons provenant de la source atteint celui des électrons sur l'île, on dit qu'ils sont en résonance et ils peuvent alors traverser la première barrière, atteindre l'île et traverser la deuxième barrière. Autrement dit, ce mécanisme assure que les électrons passent ou ne passent pas, ce qui est le propre d'un transistor. Il suffit donc d'augmenter le niveau d'énergie des électrons afin de les amener au niveau des électrons sur l'île pour que ceux-ci passent en continu. Des chercheurs de Texas Instruments ont créé un transistor hybride, soit un RTT, en incorporant un RTD à un circuit classique basé sur le silicium. Un RTT permet de réduire le nombre de dispositifs nécessaires à l'implantation de fonctions logiques et donc d'augmenter la densité des circuits intégrés. Cependant, ce circuit hybride demeure limité par le problème de miniaturisation qui affecte la lithographie conventionnelle à base de silicium. C'est pourquoi d'autres avenues où l'on utilise des RTD dans des architectures de circuits différentes des circuits au silicium font l'objet de recherches qui visent à vraiment profiter des possibilités offertes par les dispositifs à effet tunnel résonant.

Les transistors à un seul électron (TSE) fonctionnent un peu sur le même principe que les RTD. Une île contenant des électrons et isolée par un matériau semiconducteur est située entre la source et la sortie. L'île est si petite qu'elle ne peut contenir qu'un nombre très limité d'électrons libres, ce qui bloque le passage des électrons provenant de la source. Ce phénomène, appelé blocage de Coulomb, est dû à la force de répulsion des électrons entre eux (en effet, ils sont tous chargés négativement). Une électrode est située à proximité de l'île. Il suffit d'augmenter le voltage appliqué à cette électrode pour qu'un électron supplémentaire passe de la source à l'île et qu'un électron de l'île traverse vers la source, créant ainsi un faible courant continu. Il est donc possible de bloquer ou de laisser passer les électrons en modifiant le voltage de l'électrode. La plupart des dispositifs de ce type ne fonctionnent présentement qu'à des températures très basses. En effet, l'énergie thermique des électrons, si elle est excessive, peut leur permettre de franchir le blocage de Coulomb et donc de sauter sur l'île, peu importe le niveau de voltage appliqué à l'électrode. Plusieurs groupes s'emploient à mettre au point des dispositifs de ce type qui fonctionneraient à la température de la pièce. Par exemple, au milieu des années 1990, une équipe de NTT au Japon a réussi à fabriquer des TSE pouvant fonctionner à des températures relativement élevées, alors que la largeur de l'île n'était que de 30 nm.

Un autre exemple de circuit exploitant des effets quantiques et une architecture novatrice est basé sur l'utilisation de points quantiques (ou boîtes quantiques). Les points quantiques sont en quelque sorte des petites boîtes qui peuvent isoler de façon électrostatique un électron ou quelques électrons de leur environnement. Pour modifier le nombre d'électrons dans un point, il suffit de modifier leur environnement électrostatique. Actuellement, les points quantiques sont construits avec des dimensions variant entre 30 nm et 100 nm et ils peuvent contenir entre zéro et des centaines d'électrons. Cependant, les interactions entre les points quantiques permettent d'entreposer de l'information. En effet, un point quantique peut affecter un autre point quantique situé suffisamment près grâce à aux interactions électrostatiques. C'est ainsi que le champ électrique d'un point peut modifier le nombre d'électrons d'un autre point quantique rapproché. Des chercheurs ont proposé de construire des boîtes contenant cinq points quantiques dont quatre sont situés à chaque coin et le cinquième se trouve au milieu. La boîte isole ces cinq points quantiques des autres points quantiques contenus dans d'autres boîtes ainsi que de l'environnement. Le principe de fonctionnement est le suivant. Comme les électrons contenus dans un point se repoussent mutuellement, ils vont se fixer dans des coins opposés. Il est donc possible avec de telles boîtes de représenter un 0 (deux électrons contenus respectivement dans le coin supérieur gauche et le coin inférieur droit d'une boîte) ainsi qu'un 1 (deux électrons contenus respectivement dans le coin supérieur droit et le coin inférieur gauche d'une boîte). Par conséquent des fonctions logiques booléennes peuvent être implémentées au moyen de ces boîtes quantiques. Comme celles-ci communiquent entre elles par l'entremise de

leur champ électrique (par échange de photons) plutôt que par un flux de courant électrique (échange d'électrons), elles représentent une nouvelle conception d'ordinateurs radicalement différente. Cependant, plusieurs difficultés devront être surmontées pour rendre possible la création d'ordinateurs à base de points quantiques. Par exemple, pour être en mesure d'effectuer des calculs sans erreurs avec un tel type d'architecture, il faut contrôler de façon très précise la situation et la taille des points quantiques. Les structures doivent également être conçues de façon à réduire au minimum la possibilité que des électrons sortent de la boîte de façon spontanée.

Une autre méthode, approfondie par des chercheurs japonais, est basée sur les propriétés d'un fil atomique. Un fil atomique est formé par l'alignement en ligne droite d'atomes. On pourrait déplacer l'atome du centre vers le bas en appliquant un courant, puis le faire revenir à sa position originale dans le fil en relâchant le courant. C'est un genre d'interrupteur, lui aussi formé d'atomes alignés, qui permettrait de transporter le courant jusqu'au fil atomique pour déplacer l'atome. Lorsque l'atome fait partie du fil atomique, le courant peut circuler dans ce fil. Le fil peut donc servir de transistor en laissant passer ou non le courant. On a réussi à créer en laboratoire un tel fil atomique en utilisant un microscope STM. Cependant, le design de telles fonctions logiques serait limité à un espace à deux dimensions, ce qui est très limitatif. De plus, on n'a pas encore démontré comment deux fils atomiques pourraient se croiser, ce qui est absolument nécessaire pour compacter les différents fils sur une surface. L'avantage d'un tel mécanisme est qu'il nécessiterait très peu d'énergie pour fonctionner. Par contre, très peu d'énergie est nécessaire pour déplacer un atome du fil atomique, de sorte que le fonctionnement d'un tel ordinateur exigerait des températures de fonctionnement très basses, ce qui n'est pas pratique. Le grand désavantage de cette méthode est qu'il faut déplacer les atomes un à la fois avec un microscope STM, ce qui rend pour le moment la fabrication industrielle de tels fils non rentable.

Les quelques exemples de nouvelles approches présentés ci-dessus ne constituent en rien une liste exhaustive. Bien d'autres recherches se poursuivent actuellement qui portent sur de nouveaux mécanismes et de nouvelles façons de concevoir les ordinateurs. Il est évident que plusieurs de ces méthodes n'aboutiront pas à la création effective de nouveaux ordinateurs, mais cela montre que les chercheurs sont très actifs pour tenter de franchir la limite maximale (aux environs de 25 à 35 nm) à laquelle la lithographie traditionnelle sur silicium va forcément se heurter d'ici une dizaine ou une quinzaine d'années tout au plus. Le tableau 4 rapporte les principes de fonctionnement, l'état actuel de la recherche ainsi que les avantages et les désavantages des différents mécanismes vus dans cette section.

Tableau 4

Sommaire des mécanismes nanoélectroniques à l'état solide

Mécanisme	Principe de fonctionnement	Statut	Avantages	Désavantages
Resonant Tunneling Transistor	Résonance quantique dans une double barrière de puits quantiques	Capacité de fabrication de masse.	Compression. Basé sur la technologie des semiconducteurs.	Limites à la miniaturisation identique à la lithographie traditionnelle.
Transistor à un seul électron	Blocage de Coulomb.	Expérimental : ne fonctionne qu'à des températures très basses.	Gain élevé quant à la vitesse. Principe de fonctionnement identique à celui du MOSFET.	Faible température nécessaire. Difficile à contrôler.
Cellules de points quantiques	Confinement d'un seul électron dans des points quantiques.	Les points quantiques peuvent être fabriqués actuellement, mais les cellules quantiques sont encore théoriques.	Sans fil. Faible dissipation d'énergie.	Design des règles très difficile. Sensibilité au bruit.
Fil atomique	Mouvement vibrationnel d'un seul atome qui se déplace hors du fil et qui y revient.	Théorique.	Vitesse très élevée. Taille nanométrique	Faible température nécessaire. Très instable et donc non fiable.

Source: Montemerlo, *Technologies and Designs for Electronics Nanocomputers*, op. cit.

Une difficulté commune à la plupart des dispositifs mentionnés au tableau 4 est le fait qu'il faut trouver une façon de les connecter entre eux pour réaliser des circuits. Les relier avec des fils métalliques conventionnels ne sera pas possible, parce que la proximité des fils va faire en sorte que les électrons peuvent sauter d'un fil à l'autre (par un effet tunnel). De plus, il y a des limites à miniaturiser les fils, ceux-ci devenant moins fiables à mesure que le diamètre diminue. Ils risquent également de chauffer et de se briser après un nombre limité d'heures de fonctionnement. Il serait possible d'éviter ces problèmes en diminuant le courant électrique ou en utilisant des fils conçus différemment, par exemple des cristaux métalliques à un seul grain (*single grain metal crystal*). Cependant, leur résistance plus élevée ainsi que leur longueur réduiraient de façon très marquée la vitesse de fonctionnement de ces ordinateurs. De plus, le danger de migration des électrons d'un fil à l'autre limite la densité des fils, ce qui ralentit la vitesse en allongeant les

distances. Même dans le cas d'ordinateurs qui fonctionneraient sans fils (par exemple les cellules à points quantiques), ce mode de fonctionnement réduirait la vitesse de traitement de l'ordinateur. Dans les ordinateurs actuels, l'information se transmet par les fils et la vitesse de traitement est indépendante des cycles de traitement de l'ordinateur. Par contre, lorsque l'information se transmet directement d'un dispositif à l'autre, comme c'est le cas avec les cellules à points quantiques, la vitesse de traitement est forcément ralentie. Or, l'un des buts principaux visés par la miniaturisation des transistors et des ordinateurs est bien entendu d'accélérer la vitesse de traitement.

En somme, d'énormes difficultés devront être surmontées pour que des ordinateurs disposant des mécanismes nanométriques voient le jour. De nombreux chercheurs un peu partout dans le monde s'emploient à les résoudre. Plusieurs pistes demeureront stériles ou aboutiront à des résultats intéressants et techniquement réalisables, mais financièrement irréalistes, ou encore ne trouveront jamais preneur parce qu'une technologie différente mais aussi efficace aura été mise au point et adoptée plus rapidement par les principaux fabricants.

Nous pourrions également aborder ici les ordinateurs quantiques. Nous ne le ferons pas, mais il est évident qu'il s'agit là d'une avenue de recherche extrêmement prometteuse. L'idée de base est qu'un électron peut entreposer de l'information selon le sens de sa rotation sur lui-même. En effet, un électron tourne non seulement autour du noyau de l'atome mais également sur lui-même. C'est ce qu'on appelle le *spin*. Il est possible de contrôler le sens du *spin* d'un électron et d'utiliser cette possibilité pour entreposer des données. Il s'agit là d'un domaine de recherche très poussé qui va demander plusieurs années de recherche, mais il est très possible qu'au cours du 21<sup>e</sup> siècle les ordinateurs fonctionnent selon un tel principe. Une fois des ordinateurs quantiques mis au point, on se demande s'il sera possible de miniaturiser davantage les composants d'un ordinateur et si la limite fondamentale ne sera pas alors atteinte. Mais faisons confiance aux physiciens pour repousser davantage les limites encore une fois...

Avant de conclure cette section, quelques remarques s'imposent. Premièrement, malgré parfois des montants importants investis en recherche, il faut être conscient que plusieurs avenues de recherche ne mèneront jamais à la commercialisation de technologies. Cet état de fait est inhérent à la nature de la recherche scientifique, où on ne peut savoir à l'avance tout ce qu'on va trouver. Deuxièmement, les développements technologiques progressent très rapidement. Il s'agit d'une véritable course où parfois chaque mois est compté. Troisièmement, la participation à cette course coûte cher en infrastructures de recherche. Chaque année, des milliards de dollars sont investis par les entreprises dans le domaine de la recherche en électronique.

Toutefois, cela ne signifie pas que le Québec ou le Canada, qui disposent de moyens relativement modestes à certains égards, ne peuvent jouer un rôle utile dans ce secteur, bien au contraire. En effet même si le Québec et le Canada ne créeront pas nécessairement les futures technologies qui vont s'imposer dans ces secteurs, il n'en demeure pas moins que le seul fait d'effectuer de la recherche permet d'assurer une veille technologique et, surtout de former des étudiants et des chercheurs qui s'initient ainsi aux nouvelles technologies. Il suffit d'imaginer les besoins en main-d'œuvre d'une entreprise qui voudrait s'établir au Québec en vue de fabriquer des semiconducteurs pour réaliser que la main-d'œuvre formée par les universités et les centres de recherche serait alors non seulement bienvenue, mais essentielle. Enfin, il existe une certaine complémentarité entre l'expertise acquise à la suite des recherches sur les semiconducteurs et celle tirée d'autres secteurs de recherche. En effet, les méthodes de fabrication des MEMS, par exemple, utilisent la lithographie. Par conséquent, le développement de la recherche en électronique peut se faire en parallèle avec d'autres secteurs de recherche, tels les MEMS, puisque les recherches dans les deux cas vont nécessiter les mêmes équipements et en partie la même expertise.

## 5. La nanobiotechnologie<sup>24</sup>

La nanobiotechnologie (ou nanobioscience comme certains l'appellent) est un exemple parfait de l'approche *bottom-up* où les chercheurs construisent de nouvelles molécules ou de nouveaux instruments à partir d'un assemblage d'atomes. En soi, la biotechnologie pourrait être considérée comme une nanotechnologie, car elle implique l'étude et la manipulation de la matière au niveau nanométrique. En effet, une molécule d'ADN ne mesure que 2 nm de largeur, alors que les virus mesurent entre 10 et 100 nm. Cependant, en règle générale, les biotechnologistes ne se considèrent pas comme travaillant dans le domaine des nanotechnologies. Par contre, plusieurs chercheurs appartenant à des disciplines différentes de la biologie ou de la chimie, notamment des ingénieurs et des physiciens, considèrent que leur travail – lorsqu'il est appliqué au domaine de la biotechnologie – fait partie des nanotechnologies. On le voit, il n'est pas facile de définir la nanobiotechnologie. Un critère important, toutefois, est lié à l'utilisation de nanomatériaux ou encore à la création de nouveaux instruments ou appareils fonctionnant à l'échelle nanométrique, dans le champ de la biotechnologie. En fait, la distinction risque d'être de plus en plus ténue, parce que la nanobiotechnologie sera progressivement intégrée à la biotechnologie proprement dite.

---

<sup>24</sup> En plus des documents mentionnés précédemment, le Rapport MHSS 2020, *Focused Study on Biotechnology & Nanotechnology*, 29 juillet 1997, produit par SRA International, présente plusieurs exemples d'applications des nanobiotechnologies.

Cependant, il est certain que la manière d'effectuer la recherche sera radicalement changée avec l'utilisation des nanotechnologies en biotechnologie et en médecine.

Dans cette section, nous présentons les principaux domaines d'application de la nanobiotechnologie. Il faut réaliser que les recherches dans ce domaine sont encore embryonnaires et que les applications sont encore très peu nombreuses. En fait, les nanobiotechnologies représentent un immense potentiel scientifique et technologique à développer, plutôt qu'un champ scientifique bien défini et bien implanté.

## **5.1 Senseurs chimiques et biosenseurs**

La miniaturisation et l'intégration du contrôle des fluides, de l'électronique et de la photonique sont en voie de produire un changement de paradigme dans l'analyse et la synthèse chimiques. Le domaine d'application des biosenseurs et des senseurs chimiques est en pleine effervescence. En effet, les méthodes traditionnelles utilisées pour déterminer la présence et la concentration d'une molécule chimique ou d'un agent biologique sont relativement lourdes, lentes et coûteuses. Or, les médecins, les chercheurs, les responsables de la surveillance de la qualité de l'eau ou des produits alimentaires, etc., aimeraient bien pouvoir disposer le plus rapidement possible des résultats des tests, idéalement en quelques minutes plutôt que d'attendre une journée ou deux. Cela leur permettrait de réagir rapidement ou d'accélérer le processus de la recherche. En particulier, les responsables américains de la défense chargés de lutter contre une attaque bactériologique éventuelle sont très intéressés par des méthodes rapides de détection d'agents chimiques ou bactériologiques, l'anthrax par exemple.

Grâce aux nanotechnologies, les progrès sur ce chapitre ont été très rapides au cours de la dernière décennie. Le plus bel exemple est celui des recherches effectuées au Cooperative Research Center for Molecular Engineering and Technology à Canberra en Australie et qui ont mené à la mise au point d'un biosenseur extrêmement performant. Les recherches financées par le gouvernement australien ont duré dix ans et ont coûté 27 M\$ US. Le biosenseur découlant de ces recherches est basé sur des interrupteurs à canal d'ions mesurant 1,5 nm. Lorsque les récepteurs capturent la molécule ciblée, ils bloquent le passage des ions, ce qui entraîne une diminution du courant électrique et permet ainsi de détecter la présence de la molécule ciblée dans l'échantillon. En fait, ce senseur est si sensible que, si on laissait tomber un cube de sucre dans le port de Sydney, il pourrait détecter la présence accrue de sucre. Les droits de commercialisation ainsi que la propriété intellectuelle ont été accordés à la compagnie Ambri Pty Ltd. Celle-ci emploie 59 personnes à temps plein, dont le chercheur responsable du projet, et travaille actuellement à la mise au point de senseurs pour de multiples applications. La liste

des applications possibles est quasi illimitée. Les secteurs des diagnostics médicaux, de la mise au point de médicaments, des tests de contrôle de la qualité des aliments, du contrôle environnemental et industriel, le secteur de la défense (détection d'armes biologiques) ainsi que le secteur vétérinaire sont autant de domaines visés par cette nouvelle technologie. Par exemple, le senseur pourra détecter la présence d'agents pathogènes tels que la bactérie E. Coli, l'anthrax, la peste, la présence de molécules comme la Digoxin ou encore celle de l'hormone produite par une femme enceinte.

Ambri pense produire et distribuer ses premiers senseurs au cours de l'année 2001. Ces biosenseurs qui pourront tenir dans la paume de la main produiront des résultats en cinq minutes seulement, ce qui sera particulièrement utile aux médecins, aux cliniques et aux hôpitaux. De plus, cette technologie sera peu onéreuse, puisqu'un test coûtera à peine un dollar. Les marchés ciblés par Ambri ont un potentiel de plusieurs centaines de millions de dollars.

Un autre exemple de recherche en cours qui utilise une technologie totalement différente est celle menée par Christoph Gerber au laboratoire d'IBM à Zurich<sup>25</sup>. Gerber est l'un des inventeurs du microscope AFM en 1986. Le microscope AFM emploie huit cantilevers ultraminces qui mesurent chacun 500 micromètres de long, mais seulement un micromètre (soit 1000 nm) d'épaisseur. Ils sont si sensibles qu'ils peuvent fléchir de quelques nanomètres lorsqu'une molécule se dépose sur eux. L'appareil peut mesurer le changement du cantilever à la suite du dépôt d'une molécule. Il suffit donc de fixer sur ces cantilevers des molécules qui vont attirer la molécule ciblée pour détecter alors la présence de cette dernière. Lors de tests récents, des séquences d'ADN différant d'une seule paire (soit la plus petite unité d'information d'ADN) furent détectées. La technologie actuelle pour le séquençage, soit les puces ADN, est largement utilisée dans la recherche biomédicale. Cependant, l'ADN doit être rendu fluorescent pour être lu par un lecteur optique encombrant. Gerber espère que ses biosenseurs qui ne demandent pas que l'ADN soit fluorescent seront plus faciles d'utilisation. Parmi les domaines d'application visés, mentionnons l'identification des protéines, qui se fait difficilement au moyen des technologies actuelles. Ainsi, un patient susceptible de subir une attaque cardiaque imminente produit un certain nombre spécifique de protéines. La détection rapide de celles-ci permettrait de confirmer au médecin que le patient risque de faire bientôt une attaque. Gerber se plaît aussi à imaginer que dans l'avenir, des microcapsules se promèneront dans le corps humain à la recherche de cellules cancéreuses. En détectant l'une de celles-ci la microcapsule

---

<sup>25</sup> Voir « Nanotech Goes to Work », *Technology Review*, janvier-février 2001.

libérerait à cet endroit précis un médicament contre le cancer, qui serait beaucoup plus efficace que les médicaments actuels qui endommagent plusieurs cellules saines.

La recherche sur les biosenseurs et les senseurs chimiques est très intense un peu partout dans le monde. Les technologies expérimentées sont également fort variées et plusieurs d'entre elles font appel à des nanomatériaux ou à des techniques propres aux nanotechnologies.

## 5.2 Des nanobiotechnologies permettant de déjouer le système immunitaire

Une façon de soigner les diabétiques consisterait à implanter de nouvelles cellules en mesure de remplacer les cellules défectueuses du pancréas. Cependant, il faut utiliser pour ce faire des cellules provenant de porcs, ce qui entraîne automatiquement le rejet par le système immunitaire. Un chercheur, le professeur Mauro Ferrari, a cependant trouvé le moyen d'introduire des cellules sans que celles-ci se fassent attaquer par le système immunitaire<sup>26</sup>. Des cellules pancréatiques porcines sont encapsulées dans des puces au silicium qui sont couvertes d'une membrane avec des pores si petits que les anticorps ne peuvent y pénétrer. En effet, il semble que les anticorps ne peuvent pénétrer dans des orifices de moins de 18 nm, de sorte qu'en concevant une membrane avec des pores de quelques nanomètres seulement il est possible de déjouer le système immunitaire. Les membranes laissent passer le sucre et les autres fluides qui peuvent ainsi atteindre les cellules pour les nourrir et leur permettre de remplir leurs fonctions normales. Ces puces au silicium<sup>27</sup> sont insérées sous la peau. Jusqu'ici des essais d'implantation de cellules pancréatiques de porc ont été tentés avec succès sur des souris ; la prochaine étape sera d'utiliser des animaux plus grands, des chiens par exemple. Si cette étape est franchie avec succès, les essais ultérieurs porteront sur des humains.

Un autre domaine d'application utilisant la même technologie pour soigner la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson est exploré par une chercheuse qui a étudié avec le professeur Ferrari. Des cellules normales seraient implantées dans le cerveau pour produire des neurotransmetteurs appelés à remplacer les cellules endommagées.

---

<sup>26</sup> Voir “ Nanomedicine Nears the Clinic “, Technology Review, janvier-février 2000.

<sup>27</sup> En fait, il s'agit de Bio MEMs, c'est-à-dire de systèmes électromécaniques de la taille de quelques centaines de micromètres qui sont fabriqués avec des techniques de lithographie semblables à celles utilisées pour fabriquer les puces électroniques. Les recherches dans ce domaine sont très intenses et ont cours depuis de nombreuses années. Le lecteur intéressé pourra consulter Iwao Fujimasa, *Micromachines : a New Era in Mechanical Engineering*, Oxford Science Publications, 1966, ainsi que Nethrland Study Centre for Technology Trends, *Microsystem Technology : Exploring Opportunities*, 1994.

## iMEDD Inc.

La compagnie iMedd est une entreprise en démarrage qui a acquis les droits relatifs à la technologie mise au point par le professeur Mauro Ferrari, alors professeur à l'Université de Berkeley. Le professeur Mauro Ferrari est maintenant directeur du Biomedical Engineering Center à l'Ohio State University. iMedd est en train de développer des technologies en vue de résoudre les problèmes de délivrance de médicaments au moyen d'implants sous-cutanés qui utilisent des nanofiltres pour permettre une libération constante de médicaments sur une période prolongée et d'implants en biocapsule qui permettent la transplantation de cellules dans le corps sans que le système immunitaire puisse les attaquer. iMeEDD vise également à développer des technologies permettant l'absorption orale de peptides et de protéines qui sont traditionnellement administrés par voie intraveineuse et l'injection de particules intraveineuses capables de cibler et de tuer des cellules endothéliales alimentant en sang les tumeurs cancéreuses (anti-angiogénèse). Le marché des biocapsules pour les diabétiques est plus particulièrement ciblé, de même que le marché des maladies psychotiques où le contrôle des médicaments par les patients s'avère problématique. Un autre marché ciblé est celui des médicaments qui nécessitent de fréquentes injections intraveineuses. Le professeur Ferrari, le premier scientifique à avoir développé cette technologie, sert de consultant à la nouvelle compagnie iMEDD. Il avait auparavant créé lui-même une entreprise en vue de mettre au point et de commercialiser sa technologie, mais cette entreprise a fait faillite et les droits ont par la suite été vendus à iMedd. iMedd s'est établie dans le parc technologique de l'Université d'Ohio et a démarré ses activités en 2000.

Source : Site Web de la compagnie iMEDD, <http://www.stcc.org/imedddpaper.html>.

### **5.3 Un système pour séparer plus rapidement les fragments d'ADN**

Des chercheurs de l'Université Cornell ont récemment découvert une nouvelle méthode pour séparer des fragments d'ADN. La méthode traditionnelle utilise des gels et elle est lente. Les chercheurs ont découvert qu'il était possible d'utiliser plutôt ce qu'ils appellent un gel artificiel, soit un appareil de 3,5 mm de long fait de silicium dans lequel sont gravés des milliers de tunnels de 100 nm de large. Le principe de fonctionnement est le même que celui employé dans la méthode des gels traditionnels, à savoir qu'après avoir fragmenté l'ADN avec des enzymes, les fragments sont libérés dans une solution aqueuse à une extrémité. Puis un courant électrique est appliqué à l'autre extrémité, ce qui a pour effet d'attirer les fragments d'ADN qui doivent se déplacer dans les tunnels. Or, les fragments ne se déplacent pas tous à la même vitesse, les fragments plus gros étant plus rapides. Comme les fragments sont identifiés avec des marqueurs fluorescents, il est possible de localiser chaque fragment au fur et à mesure qu'il avance, soit dans le gel traditionnel ou dans le gel artificiel. Si les résultats obtenus sont les mêmes dans les deux méthodes, l'avantage du gel artificiel est que celui-ci identifie les fragments d'ADN en une quinzaine de minutes, alors qu'avec la méthode des gels traditionnels il faut compter 12 à 24 heures. De plus, il est possible de récupérer facilement les fragments d'ADN avec les gels artificiels, une opération beaucoup plus longue et complexe avec les gels traditionnels qui nécessitent des manipulations chimiques.

Les chercheurs ont bon espoir de parvenir à utiliser cette technique pour séparer des protéines ou des polymères inorganiques. Il s'agit là d'un autre exemple qui démontre les avantages que procurent les nanotechnologies dans la recherche biotechnologique.

#### **5.4 La biomimétique ou l'auto-assemblage de la matière**

L'étude des composantes de base de la vie, c'est-à-dire les cellules, les protéines, les acides aminés et l'ADN, fascine plusieurs chercheurs en nanotechnologies, la nature fonctionnant au niveau nanotechnologique depuis ses origines. Les fameux assembleurs imaginés par Drexler sont en action à l'intérieur de chaque cellule puisque celles-ci ont la capacité de reproduire d'autres cellules identiques à partir d'un bagage génétique, soit l'ADN. Les cellules disposent des machines comme le RNA et les ribosomes pour lire le plan de construction et procéder à la fabrication des acides aminés, des protéines, puis des cellules entières. C'est pourquoi des chercheurs espèrent être en mesure éventuellement de répliquer les mécanismes qui opèrent dans les cellules.

Un exemple de cette approche est fourni par Nadrian Seeman, de l'Université de New York, qui a réussi à produire des figures géométriques stables et très rigides à partir de molécules d'ADN. Seeman a eu cette idée dès le début des années 1980. L'invention des microscopes STM et AFM lui a cependant permis de progresser dans cette direction, ce qu'il n'aurait pu faire que très difficilement autrement. Il a réussi à produire des figures géométriques en trois dimensions à partir de ces molécules d'ADN. La première figure qu'il a réussi à produire était un cube. Par la suite, il a obtenu des structures de plus en plus complexes, notamment un octaèdre. L'idée de base est de séparer la double hélice de l'ADN en deux. En effet, chaque brin d'ADN est constitué de deux hélices retenues ensemble parce qu'elles se complètent et que chaque morceau est attiré par un morceau spécifique de l'autre hélice. En utilisant ces propriétés d'attraction et de répulsion, Seeman est parvenu à construire ses différentes figures géométriques à partir de fragments des hélices d'ADN. Un avantage de ces figures est qu'elles s'assemblent d'elles-mêmes lorsqu'elles sont mises en présence des morceaux correspondants. Seeman espère que les matériaux ainsi obtenus pourront éventuellement servir de base pour la construction de structures plus complexes et même d'appareils nanométriques.

Un autre exemple est celui du moteur moléculaire conçu par Carl Montemagno de Cornell. Montemagno s'est inspiré littéralement d'un moteur moléculaire vivant, soit celui de la flagelle d'une bactérie qui est semblable à une petite queue qui s'agite dans l'eau, propulsant la bactérie. En examinant celle-ci, on s'est rendu compte qu'elle était formée d'une protéine entourée de six autres protéines. Ces protéines transforment des molécules en énergie puis en

mouvement. Le chercheur a réussi à greffer ces protéines à des pièces inorganiques sur une surface micromachinée en nickel. Il a donc réussi à produire un moteur hybride nanométrique en utilisant des pièces organiques combinée à des pièces inorganiques. Les utilisations éventuelles possibles sont nombreuses. En effet, ces moteurs nanométriques pourraient servir à propulser des machines nanométriques à l'intérieur du corps humain par exemple. Les applications pratiques sont cependant probablement éloignées de plusieurs années.

Ces deux exemples ont frappé l'imagination de la communauté scientifique. Ils s'avèrent très stimulants pour plusieurs chercheurs qui estiment qu'il sera réellement possible un jour de construire des nanomachines.

Les différents exemples que nous avons présentés dans cette section sur la nanobiotechnologie ne sont pas exhaustifs. Ils constituent des exemples de recherche, certains parmi les plus connus, mais ils ne sont que des exemples des domaines de recherche et d'applications possibles. La recherche en nanobiotechnologie est très active en ce moment. Elle a fortement augmenté dans plusieurs laboratoires de recherche universitaires, et ce, tant aux États-Unis qu'au Japon ou en Europe.

## **6. Les instruments, la modélisation et la simulation nécessaires aux nanotechnologies<sup>28</sup>**

Pour se développer, les nanotechnologies ont besoin d'une instrumentation particulière ainsi que de modélisation et de simulation par ordinateur. En fait, comme nous l'avons mentionné au début, ce qui a donné son véritable essor aux nanotechnologies est l'invention en 1981 du microscope STM par des chercheurs du laboratoire d'IBM à Zurich, invention qui a valu un prix Nobel à ses deux auteurs en 1986. En effet, les microscopes optiques conventionnels sont limités par la longueur d'onde de la lumière, qui varie entre 380 et 780 nm. Il est par conséquent impossible de voir la matière à un niveau inférieur à celui de la longueur d'onde de la lumière avec un microscope optique. Certes, on a réussi à construire des microscopes à rayons X ainsi que des microscopes électroniques qui permettent de voir dans certains cas jusqu'à 0,1 nanomètre. Cependant, ces microscopes, s'ils s'avèrent très utiles pour étudier la matière inerte, sont incapables d'examiner la matière vivante. De plus contrairement aux microscopes STM, ils ne peuvent manipuler la matière. Il existe plusieurs autres microscopes que le STM qui furent développés par la suite, par exemple le Scanning Probe Microscope (SPM), mais le grand intérêt

---

<sup>28</sup> Pour un bon exposé sur les instruments, voir le chapitre 5 de Nanotechnology, Towards a Molecular Construction Kit, op. cit., ainsi que A Position Named Priscilla, National Academy Press, Washington, 1994, pour un exposé détaillé du fonctionnement du microscope STM.

du microscope STM est qu'il permet de manipuler la matière en plus de l'imager. La combinaison de la manipulation et de la visualisation de la matière accélère la recherche.

## 6.1 Le microscope STM

Depuis son invention en 1981, le microscope STM s'est largement répandu dans l'ensemble des laboratoires universitaires et industriels. Il existe même des versions à faible coût pour les écoles secondaires ou collégiales au coût d'environ 7 500 \$ US. On a comparé le fonctionnement d'un microscope STM à celui d'un tourne-disque traditionnel avec des disques en vinyle. En effet, la pointe du microscope effleure littéralement la surface du matériau observé, sans y toucher toutefois, et tout comme l'aiguille du tourne-disque, elle se déplace vers le haut ou le bas en suivant littéralement le contour des atomes. La pointe est extrêmement fine, de l'ordre d'un seul atome souvent, et elle se trouve pratiquement à toucher la surface étudiée puisqu'elle s'en approche en moyenne de 0,7 nm. On peut facilement imaginer qu'il ne fut pas facile de concevoir un appareil qui ne touche jamais à la surface à une si faible distance. Le principe de fonctionnement est basé sur le fait qu'on applique un faible courant électrique, de l'ordre d'un nanoampère (nA), au spécimen à l'étude et que les électrons peuvent alors circuler entre la pointe et la surface. Cependant, ce courant est infiniment sensible à la distance. C'est ainsi que si la pointe se rapproche de seulement 0,3 nm de la surface, le courant augmente de mille fois. Par conséquent, en mesurant constamment le courant (autrement dit le passage d'électrons entre la pointe et la surface), il est possible de mesurer la distance entre la pointe et la surface. Un ensemble piézoélectrique sophistiqué permet de maintenir constante la distance entre la pointe et la surface, de sorte que la pointe se soulève lorsqu'elle est vis-à-vis d'un atome et qu'elle baisse lorsqu'elle se trouve entre deux atomes. Le microscope STM est relié à un ordinateur qui enregistre tous ces mouvements et peut donc reproduire la surface étudiée. Pour tracer l'ensemble de la surface, il suffit de déplacer la pointe en ligne droite, puis de la déporter légèrement vers la gauche ou la droite et de recommencer jusqu'à ce que l'ensemble de la surface étudiée soit couverte. L'ordinateur peut ainsi tracer une image de l'ensemble de la surface à partir des informations obtenues.

Les premiers microscopes STM étaient fort complexes ; ils devaient fonctionner sous vide et étaient très sensibles aux vibrations et aux variations de la température. Perfectionnés, ils sont devenus beaucoup moins sensibles aujourd'hui à ces divers phénomènes. De plus, ils peuvent maintenant fonctionner dans une atmosphère normale et même dans un liquide. Plusieurs entreprises commercialisent des microscopes STM dont le prix moyen est de 100 000 \$ US environ. Cependant, les applications plus sophistiquées qui nécessitent des chambres sous vide commandent des prix variant entre 125 000 \$ US et 500 000 \$ US. En général, on considère que la

technologie du microscope STM est assez avancée et qu'elle est maintenant assez stable. Cependant, des efforts sont toujours en cours pour perfectionner ce microscope afin qu'il puisse fonctionner dans différents environnements spéciaux. Le tableau 5 rapporte les nombreuses versions du microscope STM qui ont été produites au cours des 20 dernières années. D'ailleurs, il est encore nécessaire de développer de nouveaux instruments étant donné la multiplicité des matériaux à étudier ainsi que des différentes conditions d'observation (pression, température, milieu liquide ou sec, etc.) qui diffèrent constamment.

Le microscope STM sert non seulement à étudier une surface, mais aussi à déplacer des atomes un par un, ce qui s'est avéré un exploit assez spectaculaire. Pour y parvenir, il faut sélectionner l'atome à déplacer, positionner la pointe vis-à-vis de cet atome, rapprocher la pointe de l'atome, puis soulever la pointe, l'atome collant alors à la pointe, et déplacer la pointe à l'endroit choisi, abaisser la pointe près de la surface, puis diminuer le courant électrique de sorte que l'atome est déposé sur la surface. Cette méthode a permis de produire des images spectaculaires, comme le logo d'IBM, ou encore celle dite du corail quantique, composée de 48 atomes de fer déposés sur une surface de cuivre pour former un cercle parfait<sup>29</sup>. Ces images ont certes fait le tour du monde, mais il faut réaliser qu'on est encore loin du moment où les microscope STM pourront être employés pour former des nanomachines en les assemblant atome par atome. Comme on l'a mentionné précédemment, cela prendrait 13 milliards d'années pour constituer une seule feuille de papier même avec un appareil pouvant déplacer un million d'atomes à la seconde! Par contre, nous verrons que les microscopes AFM seront sans doute bientôt utilisés pour enregistrer des données informatiques.

## 6.2 Le microscope AFM

Le microscope STM souffre d'un handicap majeur. Son fonctionnement exige en effet que la surface étudiée soit conductrice d'électricité puisque le courant doit circuler entre la pointe et la surface. Cela limite l'utilisation du microscope STM essentiellement à l'étude des métaux et des semiconducteurs. Conscient de cette lacune, Binnig, un des co-inventeurs du microscope STM, inventa en 1986 le microscope AFM (Atomic Force Microscope). Celui-ci peut non seulement imager la surface des matériaux conducteurs et semiconducteurs, mais également des matériaux non conducteurs. Il peut également fonctionner dans l'air, sous vide, dans les liquides ainsi que dans les environnements gazeux. Il permet donc d'étudier les matériaux biologiques ainsi que les polymères. Le principe de fonctionnement du microscope AFM est

---

<sup>29</sup> Pour cette image et d'autres exemples, voir le site Web d'IBM, <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/library.html>.

semblable à celui du microscope STM, à la différence que la pointe est montée sur un cantilever flexible illuminé par un rayon laser qui à son tour illumine un détecteur. Lorsque la pointe touche la surface, le cantilever plie, ce qui est observé par le détecteur. Des éléments piézoélectriques dirigent le cantilever de telle sorte que la pointe suit la surface étudiée (par exemple une cellule) avec une précision nanométrique. Le premier microscope AFM produit par une entreprise fut commercialisé en 1990. Maintenant, plusieurs entreprises américaines, européennes, russes et japonaises fabriquent des microscopes AFM. Les données enregistrées peuvent être analysées par un micro-ordinateur et les logiciels nécessaires à l'analyse détaillée des images sont disponibles.

Depuis l'invention du microscope AFM en 1986, plusieurs versions modifiées sont apparues sur le marché (voir tableau 5). Les microscopes AFM sont de plus en plus utilisés couramment par les biologistes cellulaires. En effet, le microscope AFM s'avère supérieur aux techniques classiques pour l'étude de plusieurs phénomènes cellulaires. Il permet pour la première fois d'étudier l'interaction des molécules à la surface des cellules, par exemple, ainsi que d'étudier de façon précise une seule molécule dans son environnement naturel. En effet, les immunologistes et les biologistes moléculaires sont tout particulièrement intéressés par l'étude des interactions entre les molécules présentes à la surface des cellules et d'autres molécules ou particules (ces molécules peuvent servir à reconnaître par exemple un virus ou un corps étranger). Plusieurs difficultés restent à résoudre pour permettre à ces chercheurs d'utiliser le microscope AFM dans l'étude des biomolécules directement dans la cellule vivante. Cependant, il est clair que le microscope AFM est appelé à devenir un instrument de choix pour les biologistes moléculaires. On prévoit que le microscope AFM va devenir un instrument routinier de travail pour ces chercheurs au cours des années à venir.

### **6.3 Le Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM)**

Le Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM) est un nouveau microscope mis au point en 1986. Le SNOM est en quelque sorte la combinaison d'un microscope AFM et d'un microscope optique. Le principe de fonctionnement est relativement simple. La matière étudiée est déposée sur une surface vitrée, puis éclairée par en dessous. Une partie de la lumière est captée par une sonde nanométrique de l'autre côté. La résolution spatiale est fonction de la grandeur de la sonde qui varie typiquement entre 20 nm et 100 nm. En promenant la sonde sur la surface étudiée, il est possible d'imager cette dernière. Il existe plusieurs versions du SNOM (voir tableau 5). Même si le principe de base du SNOM fut conçu en même temps que celui du microscope STM, soit au début des années 1980, la diffusion de ce microscope a été plus

longue à venir étant donné qu'il a fallu une dizaine d'années pour mettre au point une sonde de quelques nanomètres. Le SNOM s'avère essentiel, car il est pratique, non invasif et non destructeur. De plus, il peut fonctionner dans un environnement naturel (*in vivo*). On lui trouve des applications de plus en plus nombreuses dans la science des matériaux, l'optoélectronique, la chimie et la biologie. Les SNOM offrent donc un grand potentiel en nanobiotechnologie pour l'étude et l'analyse du matériel cellulaire ainsi que pour la détection de l'organisation moléculaire des membranes.

Tableau 5

Différents types de microscopes développés pour l'observation de la matière au niveau nanométrique

Nom	Sigle
Scanning Tunneling Microscopy	STM
scanning tunneling spectroscopy	STS
current imaging tunneling spectroscopy	CITS
alternating current scanning tunneling microscopy	AC-STM
reactor scanning tunneling microscopy	reactor-STM
scanning tunneling microscope arrays	micro-STM
Atomic Force Microscopy	AFM
contact mode atomic force microscopy	
friction mode microscopy	FFM
shear-force microscopy	SHFM
force modulation microscopy	FMM
atomic force acoustic microscopy	AFAM
scanning local-acceleration microscopy	SLAM
non-contact mode atomic force microscopy	
chemical force microscopy	CFM
electrostatic force microscopy	EFM
Kelvin probe force microscopy	KPFM
magnetic force microscopy	MFM
scanning Maxwell-stress microscopy	SMM
scanning near-field acoustic microscopy	SNAM
Scanning Near-field Optical Microscopy	SNOM
photon scanning tunneling microscopy	PSTM
scanning interferometric apertureless microscopy	SIAM
scanning plasmon near-field microscope	SPNM
Scanning Thermal Microscopy	SThM
scanning optical absorption microscopy	SOAM
scanning chemical-potential microscopy	SCPM
Scanning Capacitance Microscopy	SCAM
Scanning Electrochemical Microscopy	SECM
scanning ion conduction microscopy	SICM

Source : *Nanotechnology, Towards a Molecular Construction Kit*, op. cit., p. 290.

## 6.4 Applications prochaines

Des chercheurs ont récemment fait preuve d'une grande ingéniosité dans l'utilisation des microscopes AFM<sup>30</sup>. C'est ainsi que Chad Mirkin de l'Université Northwestern utilise le microscope AFM un peu comme une plume. Il trempe la pointe dans un réservoir de molécules organiques et dépose ces dernières sur une surface couverte d'atomes d'or. Les molécules coulent de la pointe du microscope à la manière de l'encre. Un étudiant a ainsi assemblé huit pointes pour reproduire en moins de dix minutes une section d'un texte célèbre de Richard Feynman, le premier scientifique en 1958 à imaginer que l'humain travaillerait bientôt sur les nanotechnologies. On pense donc aujourd'hui qu'il serait possible de faire fonctionner en parallèle des centaines sinon des milliers de pointes de microscopes AFM, de sorte qu'il serait alors possible de créer des nanostructures. Le procédé est très souple, puisqu'il peut employer différents types de molécules tant chimiques que biologiques, y compris l'ADN.

Une autre application a de bonnes chances de faire rapidement son apparition. C'est celle qui permet d'enregistrer des données au moyen de sondes AFM. En effet, des chercheurs d'IBM à Zurich ont construit récemment un appareil utilisant 1024 sondes AFM pour inscrire des trous dans un polymère. Les trous n'ont que 50 nm de diamètre. De plus, il est possible de lire et d'effacer ces trous. Avec cette méthode, les chercheurs ont réussi à inscrire 35 gigabits par centimètre carré. Une telle densité d'information permettrait de produire des disques durs contenant des téraoctets d'information, soit 40 fois ce qui est actuellement disponible. De plus, ce *nanodrive* basé sur les AFM demande moins d'énergie qu'un disque dur magnétique, ce qui se révèle avantageux pour les portables. Cette technologie est en fait une combinaison de la microélectronique et de la micromécanique. Les chercheurs d'IBM sont très optimistes et ils n'entrevoient pas de difficultés majeures à l'horizon qui soient susceptibles de bloquer le développement de cette technologie.

En ce moment, les différents microscopes AFM et STM sont employés couramment dans les industries de la mémoire magnétique ainsi que dans les industries chimiques et optiques. Les biologistes les utilisent également de plus en plus, car ces instruments leur permettent d'étudier les processus biologiques en temps réel au niveau nanométrique. Cependant, hormis certaines applications que nous venons tout juste d'évoquer, le moment où ces microscopes serviront à créer de multiples structures en série est sans doute encore loin. Cependant, l'expérience a depuis longtemps démontré qu'il est toujours fort risqué de prédire l'avenir et que même les

---

<sup>30</sup> Voir « Nanotech Goes to Work », Technology Review, janvier -février 2001.

spécialistes se trompent régulièrement. Les exemples patents vont de Bill Gates, prédisant que 650 ko de mémoire vive devraient suffire à tout le monde, au président d'IBM en 1946 qui prévoyait une demande mondiale pour six ordinateurs et au président-fondateur de Digital Equipment Corporation qui, au milieu des années 1970, ne voyait aucun marché pour des micro-ordinateurs, en passant par le directeur du bureau américain des brevets qui, en 1896, voulait fermer le bureau parce que selon lui tout ce qui avait à être découvert l'avait déjà été! En somme, il est fort probable que l'avenir nous réserve des surprises de taille en ce qui concerne la construction d'appareils nanométriques au moyen d'appareils comme les STM et les AFM.

## 6.5 La modélisation et la simulation

Les nanotechnologies peuvent faire un usage intensif de la modélisation et des simulations par ordinateur<sup>31</sup>. En effet, les chercheurs trouvent souvent très utile de procéder à une simulation par ordinateur avant de faire une expérience. Cela peut leur permettre d'optimiser la conception d'une molécule au lieu de procéder par tâtonnements, par essais et erreurs. Cela leur permet également de sauver du temps dans la conception de nouveaux matériaux, de nouveaux appareils nanométriques et d'augmenter la fiabilité de ces appareils. D'ailleurs, les compagnies pharmaceutiques y ont de plus en plus recours lorsqu'elles veulent concevoir de nouvelles molécules.

Cependant, des progrès substantiels devront être accomplis au cours des prochaines années pour développer des logiciels capables de faire des simulations extrêmement poussées. Des ordinateurs très puissants seront également nécessaires. En effet, la mécanique quantique s'avère éminemment complexe, car de nombreuses forces sont en jeu entre les atomes. Au fur et à mesure que le nombre d'atomes en interaction augmente, la complexité croît de façon non pas linéaire mais exponentielle. En fait, même les ordinateurs les plus puissants disponibles actuellement sont incapables de résoudre des simulations impliquant un nombre un tant soit peu élevé d'atomes. Les chercheurs doivent donc concevoir des méthodes simplificatrices qui permettent d'approcher la réalité. En fait, le travail à faire par les chercheurs, en particulier les mathématiciens et les concepteurs de logiciels, est énorme pour arriver à développer des outils capables de simulations complexes. En outre, malgré des avancées tangibles sur le plan de la conception d'algorithmes de simulation et de logiciels, des ordinateurs encore plus puissants seront nécessaires. Par exemple, des simulations sur ordinateur utilisant massivement des capacités de traitement parallèle sont essentielles.

---

<sup>31</sup> Voir chapitre 2 « Investigative Tools : Theory, Modeling and Simulation » dans *Nano Research Directions, IWGN Workshop Report, op. cit.*

De plus, pour que les nanotechnologies progressent, l'ensemble des étudiants en chimie, en physique, en biologie, etc., vont devoir être formés pour être en mesure, non seulement d'utiliser les nouveaux logiciels, mais également de participer à en concevoir de nouveaux. Un exemple qui montre que l'approche de la simulation s'avère fructueuse est celui de l'utilisation éventuelle du silicium dans la fabrication d'appareils optiques. Le silicium ne constitue pas un matériau satisfaisant pour fabriquer des appareils optiques parce que ce n'est pas un bon émetteur de lumière. C'est pourquoi les chercheurs utilisent plutôt de l'arséniure de gallium, dont les propriétés optiques se prêtent très favorablement à ce type d'applications. Cependant, comme le silicium est employé massivement dans la micro-électronique et que c'est une technologie bien connue et bien maîtrisée, il serait avantageux d'utiliser plutôt le silicium. Des simulations par ordinateur ont confirmé qu'il était possible d'élargir la bande optique du silicium en situant l'excitation optique dans un ensemble assez large d'atomes de silicium liés à des atomes d'hydrogène. Des expériences avaient fait ressortir cette possibilité. En utilisant de façon massive en parallèle des plates-formes d'ordinateurs ainsi que de nouveaux algorithmes, il a été possible de simuler le comportement d'agrégats importants d'atomes de silicium et d'hydrogène (par exemple 575 atomes de silicium interpénétrés par 276 atomes d'hydrogène). En effet, un tel ensemble d'atomes requiert de grandes capacités de simulation par ordinateur pour que soit déterminé correctement le comportement de ces atomes sur divers plans. On a par la suite procédé à des expériences avec de véritables atomes et on a trouvé que le comportement des agrégats d'atomes corroborait les prédictions des simulations par ordinateur. Cela illustre bien l'utilité de ces simulations et le fait que les connaissances progressent par cette interaction entre l'expérimentation et les simulations. Un exemple célèbre qui démontre l'utilité des simulations est celui de la mise au point par la compagnie Shell d'un nouveau surfactant à la suite de simulations qui prédisaient qu'un nouveau groupe de surfactants serait plus efficace que ceux produits alors par l'entreprise. Devant les résultats obtenus, les surfactants ont été synthétisés en laboratoire puis produits commercialement.

La National Science Foundation (NSF) est préoccupée par cette question, comme en témoigne un atelier de travail tenu en 1997<sup>32</sup>. Aux États-Unis, les progrès dans les calculs en mécanique quantique et en modélisation et simulation par ordinateur ont fait de grands progrès au cours des vingt dernières années. C'est ainsi que le nombre de départements de chimie qui sont engagés dans la recherche pour développer et appliquer la modélisation est passé de quelques-uns au début des années 1980 à quarante en 1997. De plus, à la suite de l'adoption du High Performance Computing Act en 1991, on a investi annuellement pas moins de 1 milliard

---

<sup>32</sup> Voir *Final Report, Workshop, Future Directions in Molecular Modeling and Simulation : Fundamentals and Applications*, NSF, 3-4 novembre 1997. Disponible sur le Web à <http://flory.engr.utk.edu/nsf>.

de dollars US dans l'acquisition d'ordinateurs à haute performance et dans le développement d'algorithmes et de logiciels. Cependant, plusieurs groupes dans le monde, principalement en chimie et en physique, travaillent à bâtir des algorithmes de chimie numérique. Ces efforts se traduisent dans des logiciels qui sont rapidement commercialisés par des entreprises et dont la diffusion est non moins rapide. La situation est toutefois plus complexe dans le cas des modélisations moléculaires. Les objectifs visés et les disciplines alors en cause sont en effet très nombreux, de sorte que les nouvelles méthodes de simulation diffèrent beaucoup d'un groupe à l'autre. Les codes de modélisation moléculaire varient d'un groupe à l'autre et ils ne sont donc pas compatibles. De plus, les interfaces graphiques, lorsqu'elles existent, sont peu conviviales et non standards. Cela décourage donc les entreprises de commercialiser les nouveaux codes produits dans les universités et les laboratoires publics. Une autre conclusion du groupe de travail de la NSF était que les chercheurs devraient davantage s'employer à simuler de nouvelles molécules, de nouvelles interactions entre atomes et particules plutôt que de chercher uniquement à reproduire les résultats d'expériences déjà réalisées en laboratoire.

La compréhension des phénomènes observés en nanotechnologies va progresser en faisant alterner les expérimentations et les simulations numériques. En somme, la modélisation et la simulation par ordinateur s'avèrent non seulement importantes mais essentielles pour l'avancement des nanotechnologies.