



nanomachines

nanostructures

nanomatériaux

avis

Conseil de la science et de la technologie

Les nanotechnologies : la maîtrise de l'infiniment petit



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. Ces arrangements sont formés par manipulation directe d'atomes.

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^e étage, bureau 3.45
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4Z2
Téléphone : (418) 644-1165
Télécopieur : (418) 646-0920

Ce document ainsi qu'un document d'accompagnement intitulé *Aperçu de la recherche sur les nanotechnologies* sont disponibles 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 : 2-550-37715-X

Juin 2001

Monsieur David Cliche
Ministre délégué de la Recherche, de la Science
et de la Technologie
Gouvernement du Québec
Québec

Monsieur le Ministre délégué,

Conformément aux dispositions de l'article 16 de la Loi du ministère de la Recherche, de la Science et de la Technologie, j'ai l'honneur de vous transmettre l'avis *Les nanotechnologies – La maîtrise de l'infiniment petit* du Conseil de la science et de la technologie.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Ministre délégué, l'expression de ma haute considération.

La présidente,
Hélène P. Tremblay

Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu au président du Comité de pilotage, monsieur Michel Desrochers, directeur de l'Institut de recherche en biotechnologie, ainsi qu'aux autres membres du Comité : messieurs Jean Beerens, directeur du CERPEMA de l'Université de Sherbrooke, Mohamed Chaker, directeur de l'INRS-Énergie et matériaux, Peter Grütter, directeur du Groupe SPM de l'Université McGill, Moussa Hoummady, président-directeur général de NanoBioGen inc., John Luong, chef du groupe de recherche sur les biocapteurs de l'Institut de recherche en biotechnologies, Michel Meunier, professeur au département de génie physique et des matériaux de l'École polytechnique et Denis Poussart, professeur au département de génie électrique et informatique de l'Université Laval.

Nous remercions également les membres du Conseil de la science et de la technologie qui ont participé aux travaux et discussions menant à la publication de cet avis.

La coordination des travaux et la rédaction du document ont été assurées par monsieur Daniel Lebeau, agent de recherche au Conseil. La section sur les universités canadiennes a été réalisée par monsieur Richard Blanchette, contractuel pour le Conseil.

La mise en forme matérielle du document a été effectuée par madame Marie-Claude Laprise, avec la collaboration de madame Hélène Lafrance. Le support en documentation fut assuré par madame Monique Blouin.

Table des matières

Préambule

Résumé	i
---------------------	----------

Introduction	1
---------------------------	----------

CHAPITRE 1

Les grands domaines de recherche en nanotechnologies	5
---	----------

1.1 Le début des recherches en nanotechnologies	5
---	---

1.2 Les nanomatériaux	6
-----------------------------	---

1.3 La nanoélectronique	11
-------------------------------	----

1.4 Les nanobiotechnologies	17
-----------------------------------	----

1.5 Les instruments nécessaires aux nanotechnologies	20
--	----

1.6 La modélisation et la simulation	22
--	----

1.7 Les constats généraux	23
---------------------------------	----

CHAPITRE 2

La recherche sur les nanotechnologies aux États-Unis, en Europe et au Japon	25
--	-----------

2.1 La recherche aux États-Unis	25
---------------------------------------	----

2.2 La recherche en Europe	32
----------------------------------	----

2.3 Les nanotechnologies au Japon	37
---	----

2.4 Les constats généraux	39
---------------------------------	----

CHAPITRE 3

État de la recherche au Canada et au Québec	43
--	-----------

3.1 La recherche dans les universités canadiennes	43
---	----

3.2 La recherche dans les laboratoires fédéraux du CNRC	50
--	----

3.3 La recherche dans les universités québécoises	52
---	----

3.4	L'initiative de Valorisation-Recherche Québec sur les nanotechnologies	56
3.5	Les constats généraux	58
CHAPITRE 4		
Une stratégie à la hauteur des enjeux		59
A – Les enjeux et les atouts du Québec		60
B – Les recommandations du Conseil		62
B-1	La constitution d'une masse critique en nanotechnologies	62
B-2	La constitution d'un réseau	64
B-3	La création de Nano-Québec	65
B-4	La construction d'un institut interuniversitaire	66
B-5	Une contribution spécifique du gouvernement canadien	69
Annexe I		
Membres du Conseil de la science et de la technologie ...		71
Annexe II		
Membres du Comité sur les nanotechnologies		73
Annexe III		
Les sigles employés dans l'avis		75
Annexe IV		
Liste des tableaux		77
Annexe V		
Liste des graphiques		79

Préambule

Le terme nanotechnologie n'existe que depuis 1974. En moins de trente ans, il a réussi à susciter les plus grands espoirs. Ainsi, la nanoscience révèle à l'échelle nanométrique des propriétés si originales de la matière qu'on ne peut les extrapoler à partir des connaissances acquises à une échelle supérieure. L'exploitation de pareilles propriétés dans le domaine des nanotechnologies promet des retombées dans tous les secteurs industriels qui viennent à l'esprit : l'automobile et l'aérospatiale, les biotechnologies, l'électronique et les communications, les industries chimiques et des matériaux, l'énergie, etc.

Les répercussions de cette révolution se font sentir même en matière de méthodologie scientifique. En effet, les nanotechnologies requièrent une approche interdisciplinaire extrêmement étendue, qui exige la contribution des sciences physiques et chimiques, du génie, de l'informatique et des mathématiques, et dans bien des cas, des sciences du vivant. Elles plaident en faveur d'une véritable convergence des savoirs disciplinaires.

Plusieurs pays ont déjà pressenti le potentiel phénoménal des nanotechnologies. Les États-Unis, en particulier, injectent depuis quelques années des sommes substantielles pour le déploiement de la recherche dans les différentes branches des nanosciences, des sommes qui croissent à un rythme essoufflant. Des centres de recherche imposants sont créés et disposent d'infrastructures sophistiquées et extrêmement coûteuses. L'instrumentation se perfectionne continuellement. Le Japon talonne les États-Unis et souhaite les dépasser au cours des prochaines années.

Le Canada fait piètre figure et n'a pas réussi à suivre le rythme imposé par ses partenaires. Dans d'autres secteurs scientifiques, il compte pourtant des équipes de chercheurs de calibre international et à la fine pointe des découvertes, par exemple en télécommunications, en génomique et en biopharmaceutique, en nouveaux matériaux, etc.

Le Québec ne se distinguait pas du Canada jusqu'à tout récemment. Toutefois, Valorisation-Recherche Québec a décidé en avril 2001 d'investir dix millions de dollars pour asseoir sur des bases solides un programme intégré de recherches sur les nanotechnologies, auquel participent les cinq universités déjà actives dans le secteur.

Cette décision, saluée unanimement par la communauté scientifique, ne suffira pas pour garantir la présence du Québec sur l'échiquier scientifique international. Grâce à de nombreuses consultations menées auprès d'experts québécois, également grâce au bilan qu'il dresse quant aux conditions de réussite requises, le Conseil de la science et de la technologie en vient à la conclusion que des efforts supplémentaires devront être rapidement consentis.

Le présent avis permet de faire le point sur l'état des connaissances en nanotechnologies dans le monde, puis sur les lieux et les modes d'organisation de la recherche les plus prometteurs. Il conclut en adressant cinq recommandations aux partenaires gouvernementaux et universitaires désireux d'offrir au Québec une place privilégiée dans une aventure scientifique qui s'annonce emballante.

Les membres du Conseil de la science et de la technologie formulent le vœu que leurs recommandations trouveront un écho favorable auprès de leurs interlocuteurs et qu'elles seront mises en œuvre sans délai.

La présidente

LES NANOTECHNOLOGIES LA MAÎTRISE DE L'INFINIMENT PETIT

Résumé

On définit les nanotechnologies 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, c'est-à-dire de celui des atomes, des molécules et des structures supramoléculaires. Un nanomètre (nm) est une unité de mesure qui correspond à un milliardième de mètre (soit 10^{-9} mètre).

Les nanotechnologies sont à proprement parler révolutionnaires. En effet, à l'échelle nanométrique les matériaux et les systèmes peuvent révéler des caractéristiques complètement nouvelles qui en modifient sensiblement les propriétés, de même que les phénomènes et les processus physiques, chimiques et biologiques en cause. Les modifications sont si fondamentales que les propriétés de la matière au niveau nanométrique ne peuvent être déduites de celles de la matière solide à plus grande échelle. Les nanotechnologies posent donc un défi scientifique immense. Les chercheurs doivent être en mesure de contrôler et de manipuler la matière, de la caractériser et de comprendre la façon d'exploiter ses propriétés pour construire de nouvelles nanostructures utiles.

Il y a donc lieu de prévoir que les nanotechnologies constitueront une véritable révolution technologique puisqu'elles permettront à l'homme de contrôler la matière au niveau de l'atome. Le Conseil de la science et de la technologie vise par le présent avis à déterminer la position que le Québec doit adopter pour participer pleinement à cette révolution.

Un examen des grands domaines de recherche en nanotechnologies dans le monde permet de formuler un certain nombre de constats :

- Les possibilités d'applications des nanomatériaux sont pratiquement infinies. Aucun secteur industriel ne sera à l'abri de l'influence des nouveaux matériaux. Même si les recherches sur le sujet se sont intensifiées au cours des deux dernières années, notamment dans le secteur prometteur des nanotubes de carbone, le domaine est encore très jeune.
- En électronique, plus particulièrement dans le domaine des ordinateurs, la lithographie conventionnelle va bientôt rencontrer un obstacle infranchissable. En 2015 au plus tard, seul un changement de paradigme dans la façon de fabriquer les semi-conducteurs permettra de poursuivre la miniaturisation des composants d'ordinateurs. Cependant, les recherches effectuées en nanoélectronique au sein d'entreprises, de laboratoires publics et de centres universitaires permettront de découvrir de nouvelles technologies susceptibles de remplacer les technologies actuelles.

- En biotechnologie, les nanomatériaux et les nanotechnologies ont déjà permis d'accélérer la recherche. Les frontières entre domaines deviennent plus floues, notamment entre la matière organique et la matière inorganique. Des micro-appareils, par exemple des MEMS, associent des cellules ou des nanoparticules d'êtres vivants et une matière inorganique comme les puces au silicium. On assiste donc à la convergence de technologies autrefois complètement distinctes, en particulier l'électronique et la biotechnologie.
- L'instrumentation, notamment les nouveaux microscopes, s'est révélée essentielle pour le développement des nanotechnologies. Si elle a atteint une certaine maturité, de nouvelles recherches demeurent nécessaires pour concevoir des instruments adaptés aux conditions spécifiques d'expérimentation.
- Enfin, les simulations par ordinateur sont indispensables aux nanotechnologies; elles nécessitent des ordinateurs extrêmement puissants ainsi que de nouveaux logiciels de simulation.

L'avis trace également un bref portrait des recherches menées aux États-Unis, en Europe, ainsi qu'au Japon. De nombreux constats s'en dégagent :

- Aux États-Unis, on note une augmentation extrêmement importante du financement gouvernemental des nanotechnologies, un secteur devenu hautement prioritaire pour le gouvernement américain. Le financement de la recherche en nanotechnologies provient de sources gouvernementales très diversifiées, des organismes subventionnaires tels que la National Science Foundation (NSF) et le National Institute of Health (NIH) certes, mais aussi des ministères, notamment celui de la Défense. Plusieurs universités américaines disposent d'un financement abondant provenant, outre du gouvernement central, de fondations privées, de leurs propres fonds de dotation ou encore, parfois, des États eux-mêmes. Ces fonds permettent la construction de centres importants et très bien équipés.
- On assiste à une convergence phénoménale entre les différentes sciences. Pratiquement tous les centres de recherche américains regroupent des physiciens, des chimistes, des biologistes, des mathématiciens et des informaticiens, et sont établis intentionnellement près des départements universitaires pour favoriser le maximum d'interactions entre professeurs-chercheurs et étudiants.
- En 1997, les pays européens dans leur ensemble ainsi que le Japon consentaient à un effort financier absolu aussi important que celui fourni par les États-Unis en nanotechnologies. Cependant, à la suite de la forte augmentation des fonds octroyés par le gouvernement américain en 2001, la situation s'est renversée, et ce sont les États-Unis qui mènent actuellement la course. Le Japon est cependant en train de mettre en œuvre une stratégie pour combler son écart, de sorte que son effort relatif (par rapport au pib) sera supérieur à celui des États-Unis au cours des années à venir. Quant à l'Europe, les fonds qu'on y consacrera dans le 6^e Programme cadre connaissent une augmentation modérée, de l'ordre de 13 %.

- Les domaines de recherche sont très diversifiés tant en Europe qu'au Japon, alors que la qualité de la recherche y est souvent égale, voire parfois supérieure à celle aux États-Unis. Tous les centres de recherche disposent d'un équipement à la fine pointe. De plus, ils sont bien pourvus en ressources humaines (p. ex. : en techniciens spécialisés) pour soutenir les chercheurs.
- Aussi bien en Europe qu'au Japon, il n'existe encore aucun centre de recherche voué exclusivement aux nanotechnologies. La plupart des recherches sont menées dans des centres spécialisés, soit dans les matériaux, soit en électronique, en raison de la nécessaire complémentarité entre les expertises requises et entre les besoins d'équipement. Même aux États-Unis, la création de centres voués exclusivement aux nanotechnologies demeure rare.

Alors que les États-Unis, la plupart des pays d'Europe et le Japon ont fait des nanotechnologies un domaine de recherche prioritaire, le Canada et le Québec accusent un sérieux retard.

Au Canada, seuls deux instituts de recherche du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) sont actuellement actifs en nanotechnologies. Il semble toutefois que le CNRC s'apprête à implanter un institut spécialisé en nanotechnologies en Alberta. Les universités québécoises doivent accélérer leurs recherches au cours des années qui viennent si on veut éviter que le Québec prenne un retard trop important. La création de Nano-Québec, annoncée dans le cadre du projet soumis à VRQ, constitue un moment charnière susceptible d'appuyer à court terme les universités afin d'intensifier la recherche en nanotechnologies. Nano-Québec offrira également l'avantage de favoriser la concertation et la mise en réseau des principaux chercheurs québécois. Cependant, le Québec demeure vulnérable et requiert que les deux paliers de gouvernement consentent à investir des ressources financières importantes.

Les enjeux pour le Québec sont cruciaux et consistent surtout à assurer sa participation à l'essor du corpus scientifique, à constituer une masse critique de chercheurs de haut calibre dans toutes les disciplines touchées par les nanotechnologies, à maximiser les synergies entre les chercheurs et centres de recherche concernés, à procurer à ces chercheurs l'équipement dont ils ont besoin pour mener à bien leurs travaux et, enfin, à attirer des étudiants et à former une main-d'œuvre de calibre international pour alimenter le bassin de chercheurs, et atteindre la masse critique recherchée. Ces enjeux apparaissent d'autant plus exigeants qu'ils sont intimement reliés et ne permettent pas de demi-mesure, l'ampleur des infrastructures requises étant très élevée.

Or, le Québec peut déjà miser sur des atouts précieux. Ainsi :

- 1) Le Québec compte une soixantaine de chercheurs œuvrant en nanotechnologies dans plusieurs des universités québécoises, ce qui équivaut à une trentaine de personnes à temps plein.

- 2) Le conseil d'administration de Valorisation-Recherche Québec a décidé en avril 2001 d'assurer jusqu'en 2004 la couverture des coûts d'opération et d'entretien de l'équipement récemment acquis, le financement de stagiaires post-doctoraux, ainsi que la mise en réseau des chercheurs à l'échelle québécoise et internationale.
- 3) Les cinq universités concernées se sont engagées à définir un programme de recherche commun, au sein d'un organisme de gestion, et à recruter 54 professeurs supplémentaires. Pareille entente est un gage puissant de réussite en vue d'un développement rapide et harmonieux du secteur.

Recommandations

Le Conseil de la science et de la technologie recommande la constitution d'une masse critique de chercheurs au sein d'un réseau véritablement intégré de recherche à l'échelle québécoise, l'acquisition des infrastructures physiques requises et la collaboration nécessaire du gouvernement fédéral à la réalisation de ce vaste chantier.

La constitution d'une masse critique minimale de chercheurs permanents, qui seront entourés de chercheurs associés, d'invités, de stagiaires post-doctoraux et d'étudiants, est essentielle pour assurer le déploiement de ce secteur. L'engagement pris par les universités, s'il se réalise, devrait permettre de rencontrer les exigences fixées.

Recommandation 1

Que les universités et les gouvernements prennent toutes les dispositions nécessaires pour recruter et favoriser l'embauche de 54 professeurs-chercheurs spécialisés en nanotechnologies prévue au plan soumis à VRQ.

Les nanotechnologies étant par essence interdisciplinaires, les chercheurs et leurs équipes doivent travailler en réseau, à l'intérieur même des universités et entre universités, ainsi qu'avec les laboratoires gouvernementaux. L'établissement d'un tel réseau nécessite la création d'un organisme de coordination, de planification et de suivi, profitant d'un soutien administratif permanent. La création de Nano-Québec satisfait à cette exigence. Elle offre également le triple avantage de donner une visibilité internationale aux recherches qui seront poursuivies, de maximiser les interactions avec les centres du reste du Canada et de l'étranger, de même que d'attirer des étudiants, stagiaires et invités, au sein du réseau.

Recommandation 2

Que les directeurs des différents départements, les doyens et les responsables de la recherche dans les universités déploient les moyens nécessaires pour favoriser les interactions entre les chercheurs et les étudiants, dans le champ des nanotechnologies.

Nano-Québec sera l'organisme tout indiqué, avec l'appui de ses membres, pour faire la promotion du réseau auprès des autorités gouvernementales québécoises et canadiennes. Nano-Québec aura notamment pour mission de structurer les recherches qui seront menées au Québec autour d'une programmation commune, de favoriser le réseautage des différents chercheurs impliqués au sein des universités et des laboratoires gouvernementaux, d'assurer leurs liens avec les réseaux étrangers les plus performants, de même que de promouvoir les recherches en nanotechnologies auprès du milieu industriel, des jeunes et du public en général.

Recommandation 3

Que les universités et le gouvernement du Québec appuient concrètement la création de Nano-Québec.

Le Conseil affirme qu'il est fondamental et urgent que le Québec se dote d'un institut interuniversitaire de calibre international dans le secteur des nanotechnologies, comprenant un pôle central à Montréal et deux antennes, l'une à Québec et l'autre à Sherbrooke. Pour réussir pareille entreprise, cet institut devra pouvoir compter sur des conditions comparables à celles des instituts de même nature. Par ailleurs, le Conseil suggère que les infrastructures acquises soient également mises au service du secteur des microtechnologies. En effet, plusieurs techniques de microtechnologies, que ce soit dans le domaine de l'électronique ou dans celui des MEMS, nécessitent le même type d'équipement que les nanotechnologies.

L'institut pourrait être géré par Nano-Québec.

La construction d'un tel institut devrait coûter environ 100 M \$, dont le tiers en immobilisations et les deux tiers en équipements. L'institut aurait ainsi la taille des centres américains majeurs répertoriés. Les consultations menées au Québec dans le cadre du présent avis confirment la justesse du montant.

Le gouvernement québécois doit être le partenaire central dans la création de l'institut. Mais l'ampleur des investissements envisagés nécessitera une participation financière substantielle du gouvernement fédéral.

Recommandation 4

Que le ministre délégué de la Recherche, de la Science et de la Technologie se porte responsable de l'implantation, d'ici trois ans, d'un centre majeur spécialisé en nanotechnologies et en microtechnologies au Québec.

Les universités ne sont pas seules à être interpellées dans l'aventure. Tous les pays qui marquent le pas en nanotechnologies mettent à contribution leurs laboratoires publics. Le Canada ne peut pas faire exception.

Il semble que le Conseil national de recherche Canada (CNRC) ait pris l'initiative d'établir un institut voué aux nanotechnologies, à Edmonton en Alberta, mais cet effort ne peut suffire au Québec, pour des raisons à la fois d'éloignement géographique et de spécialisation scientifique de l'institut albertain. Les laboratoires du CNRC au Québec doivent poursuivre des recherches en nanotechnologies.

De plus, le gouvernement canadien devrait lancer un ou des programmes spécifiques du type de Génome Canada.

Recommandation 5

Que le ministre délégué de la Recherche, de la Science et de la Technologie mène les démarches nécessaires pour que le gouvernement canadien contribue substantiellement au développement des nanotechnologies au Québec.

Introduction¹

Des visionnaires

Le terme nanotechnologie fut utilisé pour la première fois en 1974 par Norio Tanigushi. Il fut toutefois popularisé par K. Éric Drexler dans les années 1980, lorsque celui-ci introduisit le terme de « manufacture moléculaire ». Richard Feynman a été le premier scientifique à avancer l'idée qu'il serait bientôt possible pour l'homme de transformer la matière au niveau atomique. Dans un discours visionnaire devenu depuis célèbre, prononcé en décembre 1959 devant l'American Physical Society, il envisageait la possibilité de faire tenir tout le contenu de l'encyclopédie Britannica sur la tête d'une épingle et de réorganiser la matière atome par atome².

Définition des nanotechnologies

Le rapport du National Science and Technology Council³ sur les nanotechnologies définit les nanotechnologies 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. Un nanomètre (nm) est une unité de mesure qui correspond à un milliardième de mètre (soit 10^{-9} mètre). Pour mieux en apprécier la dimension, 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 10 mètres de long), 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.

Une définition floue

Cette définition du National Science and Technology Council masque le fait qu'il n'y a pas d'unanimité en ce moment quant au contenu de ce nouveau champ scientifique, tant au Québec qu'ailleurs dans le monde. Aucune rencontre internationale ne se tient encore sans que cette question soit évoquée. Cette indécision est ressortie au début des travaux préparatoires au présent avis, pour se dissiper en grande partie par la suite.

Une définition à baliser

Le Conseil de la science et de la technologie en retient qu'il est important de ne pas définir les nanotechnologies de façon trop large, sinon un fort pourcentage de scientifiques pourraient abusivement se réclamer du secteur, le transformant en secteur fourre-tout. N'est pas davantage opportune une définition trop pointue, susceptible de faire perdre de vue les liens théoriques et appliqués qui doivent être tissés entre les différentes disciplines et les multiples objets de recherche concernés. Le problème tient au fait que les chimistes, les physiciens et les biologistes peuvent tous prétendre travailler

1. 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, February 2000. National Science and Technology Council, *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*. National Science and Technology Council, *Nanotechnology Research Directions : IWGN Workshop Report*, September 1999. World Technology Evaluation Center, *R&D Status and Trends in Nanoparticles, Nanostructured Materials, and Nanodevices in the United States*, January 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*, Edited by Arthur ten Wolde, STT Report 60, 1998.

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

3. National Science and Technology Council, *National Nanotechnology Initiative : Leading to the Next Industrial Revolution*, op. cit., p. 15.

à l'échelle nanométrique, le plus souvent dans un cadre théorique mais également pratique. Ainsi, plusieurs des phénomènes étudiés par les biologistes se situent au niveau nanométrique : ADN, virus, interactions entre une cellule et son environnement, etc. Le cas des physiciens est encore plus patent : plusieurs d'entre eux étudient et effectuent des manipulations au niveau atomique depuis plus de cinquante ans, particulièrement depuis la maîtrise de l'énergie nucléaire. Il en est de même des chimistes, qui réalisent des travaux à l'échelle nanométrique depuis au moins un siècle : la catalyse chimique appliquée au raffinage du pétrole, à la découverte de médicaments, de polymères et de plastiques fournit un exemple parfait de nanotechnologies avant la lettre.

La faculté de manipuler la matière au niveau atomique est certainement la marque distinctive la plus forte des nanotechnologies. D'ailleurs, une interprétation très restrictive limiterait les nanotechnologies à la construction de molécules ou de particules à partir d'atomes individuels. Rares sont les recherches qui correspondraient actuellement à cette grille dans le monde.

Définition retenue

Les définitions de nanoscience et de nanotechnologies qui seront retenues dans le présent avis, découlent des discussions et des consultations faites auprès de chercheurs québécois actifs dans ces secteurs. La nanoscience est donc le domaine qui porte sur l'étude des phénomènes observés dans des structures et systèmes : (1) dont la taille, dans au moins une dimension de l'espace, s'exprime en nanomètres; et (2) qui possèdent des propriétés découlant spécifiquement de cette taille nanométrique. Les nanotechnologies sont quant à elles le domaine qui s'intéresse aux applications de ces phénomènes. La deuxième condition mentionnée ci-dessus permet de distinguer les activités « nano » de celles qui se déroulent depuis longtemps, par exemple en biologie ou en chimie macromoléculaire. Cette condition fait également en sorte d'écarter les travaux sur la miniaturisation des transistors, puisque les transistors fonctionnent à partir d'un principe classique de la microélectronique, et par conséquent ne recourent pas aux effets spécifiques qui se manifestent uniquement à l'échelle nanométrique. Par contre, certaines structures photoniques, dont la taille peut être de quelques centaines de nanomètres, présentent de nouveaux effets de confinement de photons qui font l'objet d'études fondamentales et appliquées, et s'inscrivent ainsi dans la définition retenue des domaines de la nanoscience et des nanotechnologies.

*Les propriétés
différentes de la
matière au niveau
nanométrique*

Les nanotechnologies sont à proprement parler révolutionnaires. En effet, à cette échelle de mesure, les matériaux et les systèmes peuvent révéler des caractéristiques jusque-là complètement inconnues. Cette découverte vient modifier sensiblement la connaissance qu'on a de leurs propriétés ainsi que des phénomènes et processus physiques, chimiques ou biologiques en cause. On est alors à même de constater que les propriétés de la nano-matière ne peuvent être déduites de celles de la même matière à plus grande échelle.

*Domaines
d'applications*

Les possibilités d'application des nanotechnologies sont pratiquement infinies et touchent tous les domaines technologiques qui peuvent venir à l'esprit. Si une partie seulement de ces applications se concrétise, elle

entraînera des bouleversements inédits au sein des industries aéronautique, automobile, chimique, électronique, pharmaceutique, de l'énergie, de l'environnement, etc.

Domaines et exemples d'applications des nanotechnologies

- **Industries automobile et aéronautique** : matériaux renforcés par des nanoparticules qui sont plus légers, pneus renforcés par des nanoparticules 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 média 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** : des catalyseurs qui augmentent l'efficacité énergétique des usines de transformation chimique et qui augmentent l'efficacité de la combustion des véhicules moteurs (ce qui va diminuer la pollution), des outils de coupe extrêmement durs et résistants, des fluides magnétiques *intelligents* pour les lubrifiants et les joints d'étanchéité.
- **Industries pharmaceutiques, des biotechnologies et des soins de santé** : de nouveaux médicaments basés sur des nanostructures, des systèmes de diffusion des médicaments qui ciblent des endroits précis dans le corps, des matériaux de remplacement biocompatibles avec les organes et les fluides humains, des kits d'autodiagnostic pouvant être utilisés à domicile, des senseurs pour des laboratoires tenant sur une puce, des 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, des 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, autoassemblage de structures à partir de molécules, des matériaux inspirés par la biologie ainsi que des 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 plus petits circuits.
- **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, des pièges nanostructurés pour enlever les polluants des rejets industriels, caractérisation des effets des nanostructures sur l'environnement, des réductions importantes dans l'utilisation des matériaux et de l'énergie, réduction des sources de pollution, de nouvelles opportunités pour le recyclage.
- **Défense** : des détecteurs et des correcteurs d'agents chimiques et biologiques, des circuits électroniques beaucoup plus efficaces, des matériaux et des recouvrements nanostructurés beaucoup plus résistants, des textiles légers et qui se réparent d'eux-mêmes, remplacement du sang, des systèmes de surveillance miniaturisés.

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

*Les
nanotechnologies :
troisième révolution
technologique*

Il y a donc lieu de prévoir que les nanotechnologies constitueront une troisième révolution technologique, la première ayant donné naissance à la révolution industrielle, et la deuxième ayant été reliée à la microélectronique.

*Objectifs et plan de
cet avis*

Le Conseil vise par le présent avis à déterminer la position que le Québec doit adopter pour entrer dans l'ère de cette troisième révolution. Dans un premier chapitre, nous décrirons l'éventail des champs de recherche explorés en nanotechnologies dans le monde et leurs applications prévisibles. Ce chapitre couvre les trois grands domaines d'applications possibles, à savoir les nouveaux matériaux, l'électronique et les biotechnologies, de même que les principaux instruments qui ont permis leur développement. Nous exposerons au second chapitre les différents modèles d'organisation et de financement de la recherche, de même que les principaux acteurs en présence. Dans le troisième chapitre, nous nous pencherons sur la situation qui a cours au Canada et en particulier au Québec. Après avoir tracé, dans le quatrième et dernier chapitre, un portrait des enjeux auxquels le Québec est confronté et des atouts dont il dispose, nous terminerons par cinq recommandations, conçues pour doter le Québec d'un pôle majeur dans ce secteur.

Les grands domaines de recherche en nanotechnologies

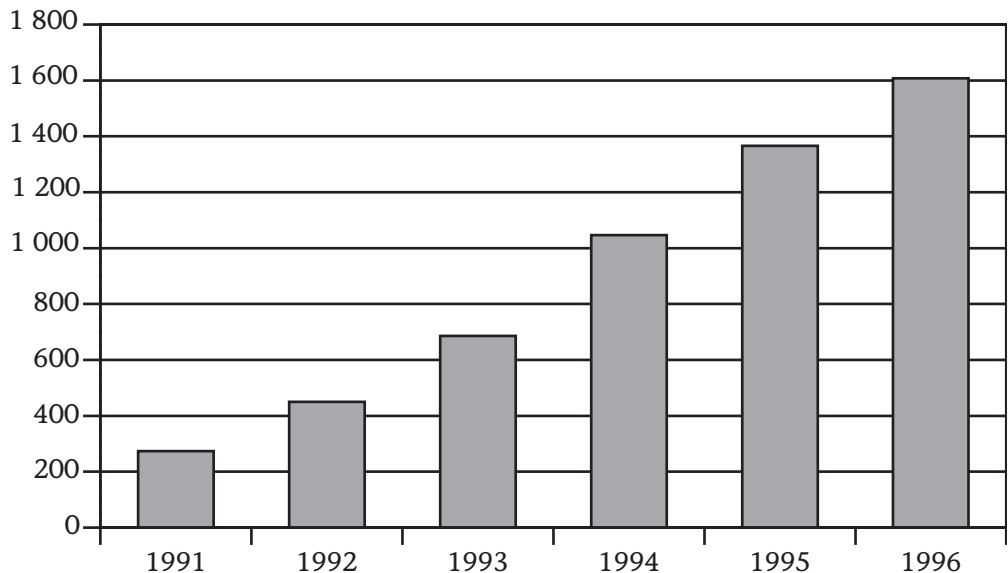
1.1 Le début des recherches en nanotechnologies

K.E. Drexler

C'est probablement la publication en 1986 du volume *The Engines of Creation*⁴ qui a le plus contribué à faire connaître le terme nanotechnologies auprès du grand public. Son auteur, K. Éric Drexler a exposé sa vision des nanotechnologies et, en particulier, leur capacité à révolutionner la totalité des modes de production en usage. Dans les années qui ont suivi, se sont tenues aux États-Unis les premières conférences internationales sur les nanotechnologies. En 1990, l'English Institute of Physics a publié le premier journal scientifique consacré aux nanotechnologies. Plusieurs autres ont paru depuis cette date.

Le graphique 1 témoigne de l'explosion qu'a connue la recherche sur les nanotechnologies au cours des années 1990. Deux articles ont paru sur ce sujet en 1988, 274 en 1991, puis 1 047 en 1994 et 1 607 en 1996. Cette croissance s'est poursuivie au cours des années suivantes.

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, No 2 (1998), 195-205.

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

Les joueurs les plus importants en nanotechnologies

Le nombre de conférences portant spécifiquement sur les nanotechnologies a lui aussi connu une croissance fulgurante; par exemple, 12 conférences internationales se sont déroulées en novembre 2000, et 10 le mois suivant, dans des pays aussi divers que les États-Unis, la France, la Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse.

Le tableau 1 indique la provenance géographique des articles publiés entre 1988 et 1996. Il montre que les États-Unis arrivent bons premiers avec près de 34 % des publications, suivis par le Japon (10,6 %), l'Allemagne (8,9 %) et la France (8,2 %). Le Canada, quant à lui, occupe le même rang que l'Espagne et l'Italie avec seulement 2,5 % du nombre total d'articles.

L'interdisciplinarité marque profondément les recherches effectuées en nanotechnologies. En effet, plus de 1 299 articles, c'est-à-dire 24 % des 5 416 articles parus entre 1991 et 1996, étaient de nature multidisciplinaire.

Tableau 1
Répartition des articles sur les nanotechnologies par pays, 1998 à 1996

Pays	%
États-Unis	33,6
Japon	10,6
Allemagne	8,9
France	8,2
Chine	5,6
Royaume-Uni	4,1
Russie	3,6
Espagne	2,6
Canada	2,5
Italie	2,4

Source : M. Meyer et Persson, op. cit.

Plusieurs méthodes permettent de relever l'état d'avancement de la recherche en nanotechnologies. Celle qui sera retenue ici regroupe l'ensemble en trois grands domaines, à savoir les nanomatériaux, la nanoélectronique et l'utilisation des nanotechnologies en biotechnologie. Cette classification, en partie arbitraire, offre l'avantage de la simplicité, et renvoie à des domaines connus et importants. L'exposé sera complété par un survol des instruments indispensables au secteur.

1.2 Les nanomatériaux⁵

Les nanomatériaux sont ceux 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, les recherches ont permis de constater que, lorsqu'on réduisait sensiblement la taille de ces grains, leurs propriétés changeaient de manière fondamentale.

5. Pour une bonne vulgarisation des propriétés nouvelles des nanomatériaux, voir Richard W. Siegel, *Creating Nanophase Materials*, Scientific American, December 1996.

Des propriétés fort différentes des matériaux traditionnels

En effet, plus la taille d'une nanoparticule 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, alors qu'un matériau composé de nanoparticules de 15 nm est près de trois fois plus résistant et celui formé de particules de 6 nm, cinq fois plus. Le matériau devient également plus malléable (ductile) et donc plus difficile à briser sous l'effet d'un choc. Il y a habituellement un choix à faire entre la dureté et la ductilité d'un matériau. Or, celui composé de nanoparticules peut être à la fois plus dur et plus ductile qu'un matériau ordinaire. Les processus physiques qui expliquent ces phénomènes ne sont pas encore complètement compris : on pense généralement que la réduction de la taille des particules entraîne des modifications dans les liens atomiques (basés sur le partage des électrons) qui seraient responsables de la dureté plus élevée du matériau. Pour ce qui est de la ductilité, les particules à cette échelle glisseraient mieux entre elles lorsque survient un début de fracture, un peu comme des grains de sable sous l'effet d'un choc. C'est ainsi que des chercheurs ont réussi à obtenir des céramiques à la fois plus dures et plus résistantes aux chocs.

Un ratio surface sur volume élevé

Une autre propriété caractéristique des nanoparticules apparaît dans un ratio surface-volume beaucoup plus élevé que celui des particules de taille régulière. Ainsi, un catalyseur à base de nanoparticules peut absorber davantage de matière et améliorer sa performance dans des conditions variées, par exemple en fractionnant mieux le pétrole. Certaines nanoparticules sont poreuses, donc utiles pour absorber des composés chimiques polluants ou encore entreposer l'hydrogène de façon sécuritaire.

Les nanomatériaux : plusieurs défis à relever

Un des grands défis que pose l'utilisation des nanomatériaux réside dans leurs coûts de production, nettement supérieurs à ceux des matériaux traditionnels, du moins pour le moment.

Production complexe et coûteuse

L'entreposage des nanoparticules exige des soins particuliers. En effet, puisque leur surface exposée est grande, elles sont très réactives et peuvent, par exemple, facilement s'oxyder. De plus, elles cherchent souvent à s'agglomérer entre elles. Il faut donc les entreposer soit dans un gaz inerte, soit en les enrobant d'une couche protectrice constituée de polymères ou de sels. Si l'on choisit des sels, il faudra en plus les enlever avant l'utilisation des particules. Par ailleurs, la taille des nanoparticules peut varier en cours de production, parfois de plusieurs nanomètres, de sorte qu'il faudra procéder à des transformations supplémentaires pour obtenir des nanoparticules de taille similaire. Leur production demeure encore complexe et souvent coûteuse.

En somme, de nombreuses recherches doivent encore être menées pour mieux comprendre tous les phénomènes reliés à la création, à l'entreposage, à la manipulation et à l'utilisation des nanoparticules, et davantage pour faciliter leur exploitation en entreprise.

Des exemples de recherches et d'applications des nanomatériaux

Les domaines de recherche et, par conséquent, d'application des nanomatériaux sont tellement vastes et diversifiés que la meilleure façon d'en donner une idée juste reste de procéder à l'aide d'exemples.

Les composites polymères renforcés par l'ajout de nanoparticules

Un premier exemple est celui des composites polymères et de leur application dans l'industrie automobile. C'est un domaine de recherche très étudié et prometteur. En effet, il est possible de renforcer les polymères classiques (plastiques) en leur incorporant des nanoparticules. Cet ajout a pour résultat de leur conférer un niveau de résistance voisin de celui de l'acier, mais à une fraction seulement du poids, ce qui permet de réduire la consommation d'essence. Qui plus est, ces polymères renforcés ne sont pas corrosifs. Des recherches sont en cours pour trouver une ou des méthodes permettant une diffusion parfaite de ces nanoparticules dans les polymères ainsi qu'une réduction de leurs coûts de production. Dow Chemical 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 les mêmes matériaux seront utilisés dans les secteurs de la construction, des appareils électroménagers, des appareils récréatifs et médicaux, etc.

Alliages métalliques très résistants

La création d'alliages métalliques extrêmement résistants fournit un autre exemple. Durant la dernière décennie, on a développé des composés sous forme d'alliages de tungstène-carbone-cobalt ou encore de titane-carbone-fer. En recourant à des méthodes traditionnelles de production, les grains les plus petits étaient de l'ordre de 300 nm. Or, au cours des dernières années, de nouvelles méthodes basées sur les nanotechnologies ont produit 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 présentement dans la fabrication de mèches pour le forage du métal.

Des céramiques nanostructurées très utiles

Les céramiques nanostructurées représentent un domaine prometteur de recherche. En effet, les céramiques formées à l'aide de nanoparticules se montrent plus résistantes et plus ductiles que les céramiques traditionnelles. Les applications en sont fort nombreuses. Ainsi naît la possibilité de bâtir des fenêtres « intelligentes » en leur incorporant des céramiques électrochimiques capables de réduire les besoins de chauffage et de climatisation des édifices, grâce à un meilleur contrôle des émissions de rayons infrarouges et visibles. Le recours à des céramiques électrochimiques entraînerait également une amélioration notable de la performance des batteries rechargeables.

Des plastiques qui s'enflamment moins facilement

L'ajout de nanoparticules d'argile de silicates suffirait à réduire de façon marquée l'inflammabilité du plastique et à lui conférer une résistance supérieure à l'usure, sans en modifier pour autant les caractéristiques mécaniques.

Le tableau 2 rapporte une liste d'utilisations possibles des nanomatériaux au cours des années à venir. Or, cette liste, déjà impressionnante, n'est pas exhaustive. Le domaine est en pleine effervescence et ses retombées, encore impossibles à prévoir.

Tableau 2
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 basés sur des matériaux superparamagnétiques
élimination des polluants dans les équipements de génération d'électricité

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

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

Senseurs hautement sensibles
senseurs pour différents gaz tels CO_2 , NO_x , SO_x , CO , et CH_4
senseurs à rayons UV et senseurs optiques robustes basés sur du siliciure de carbone nanostructuré
détecteurs de fumée
détecteurs de glace sur les ailes d'avion

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

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

Les fullerènes et les nanotubes de carbone⁶

Une nouvelle molécule fait son apparition en 1985, le fullerène, qui consiste en un assemblage d'atomes de carbone ayant la forme d'un ballon de soccer. Le fullerène le plus courant comprend 60 atomes de carbone (appelons-le C_{60}). L'atome de carbone a la propriété de s'unir facilement à plusieurs autres atomes par liaison d'électrons.

6. Cette section s'inspire notamment de Philip G. Collins et Phaedon Avouris, *Nanotubes for Electronics*, Scientific American, December 2000. Alex Zettl, *Silence les nanotubes*, La Recherche, No 332, Juin 2000. Boris I. Yakobson et Richard E. Smalley, *Des matériaux pour le troisième millénaire*, La Recherche, No 307, Mars 1998. Pour une présentation plus technique, voir M.S. Dresselhaus et al. *Nanotechnology in Carbon Materials*, Chapitre 7 de *Nanotechnology*, Editeur Gregory Timp, Springer-Verlag, New York, 1999.

Découverte des nanotubes de carbone

Si la fin des années 1980 et le début des années 1990 ont marqué l'apogée du C_{60} , ce sont dorénavant les nanotubes de carbone qui font l'objet d'intenses recherches, un peu partout dans le monde. Les nanotubes ont été découverts en 1991 par Sumio Iijima de la compagnie japonaise NEC, au moyen d'un microscope électronique. En réalité, des chercheurs en avaient produit depuis de nombreuses années, mais sans en prendre conscience. Plusieurs propriétés des nanotubes soulèvent l'intérêt. En effet, ils sont chimiquement très stables, chaque atome étant lié à trois autres atomes de carbone. Les atomes forment un cylindre de quelques nanomètres seulement de circonférence, mais dont la longueur peut atteindre plusieurs milliers de nanomètres. Les nanotubes de carbone peuvent même comporter plusieurs parois (cylindres), ce qu'a réalisé Iijima en 1991. En 1993, celui-ci et un chercheur d'un laboratoire d'IBM ont créé, chacun de leur côté, des nanotubes de carbone comportant une seule paroi.

Les propriétés étonnantes des nanotubes de carbone

Les propriétés des nanotubes de carbone sont tout à fait étonnantes. On a calculé par exemple qu'un câble composé entièrement de nanotubes de carbone et mesurant 2,5 centimètres d'épaisseur, soit 10^{14} 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. Chaque nanotube est extrêmement résistant tant à la pression qu'à l'étirement et à la chaleur. 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. Or, il est absolument nécessaire qu'ils tissent des liens très forts entre eux pour former un câble solide. Richard Smalley prévoit que les nanotubes pourront un jour servir à la construction de ponts ou de gigantesques gratte-ciel antisismiques, de véhicules spatiaux, d'avions et de véhicules terrestres à la fois légers et très résistants, de même que de gilets pare-balle légers. Des recherches poussées sont encore nécessaires pour que ces projections se réalisent.

De grands défis à relever

Deux autres problèmes en ont jusqu'ici limité l'emploi à des fins industrielles. D'une part, il s'avère très difficile de manipuler des nanotubes, étant donné leur taille nanométrique. Par exemple, des chercheurs ont réussi à fabriquer des nanocircuits électroniques, mais ils ont dû manipuler chaque nanotube avec des microscopes à force atomique : on est donc très loin d'une production en série. D'autre part, le coût des nanotubes est encore très élevé, 150 fois le prix actuel de l'or, en fait. Cependant, si une demande pour les nanotubes se matérialise, des techniques de production beaucoup moins coûteuses seront sans aucun doute mises au point.

Des applications prochaines

Malgré tout, des applications semblent imminentes. En effet, devant un auditoire de spécialistes en 1999, 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 il consomme moins d'énergie. La rumeur veut que ce nouvel écran soit mis sur le marché en 2001. Ce serait l'un des tout premiers produits à être commercialisé.

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 être employés pour dissiper la chaleur, dans des moteurs par exemple (ce qui permettrait l'utilisation de plastiques, impossible actuellement).

Des applications possibles des nanotubes en électronique

Les nanotubes attirent surtout l'attention des chercheurs en électronique. Car leur configuration leur permet d'être en fait soit des conducteurs, soit des semi-conducteurs. Cette propriété 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 transistors, ou FET) en reliant deux électrodes métalliques avec des nanotubes. Les électrons circulent d'une électrode à l'autre, via le nanotube qui peut fonctionner à température ambiante et démontrer des propriétés semblables à celles des transistors à base de silicium. De plus, le nanotube de carbone, grâce à sa taille, utilise beaucoup moins d'électricité. Des théoriciens ont prédit que des interrupteurs composés entièrement de nanotubes pourraient fonctionner à des vitesses d'un térahertz ou plus, soit 1 000 fois plus rapidement que les processeurs actuellement disponibles. Le principal problème demeure ici aussi de les manipuler efficacement ou, du moins, de trouver une méthode efficace d'assemblage.

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.

1.3 La nanoélectronique

La loi de Moore

Les immenses progrès réalisés jusqu'à maintenant dans l'augmentation de la puissance des ordinateurs sont essentiellement dus à la capacité d'installer des transistors de plus en plus petits sur une surface donnée. Vers le milieu des années 1960, Gordon Moore, un des fondateurs d'Intel, observait que le nombre de transistors contenus dans les circuits intégrés doublait environ tous les ans; 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, au rythme de 18 plutôt que de 12 mois. Cependant, les problèmes de miniaturisation des circuits deviennent de plus en plus difficiles à surmonter, la limite physique ultime se situant vraisemblablement autour de 20 à 30 nanomètres.

Par contre, des percées réalisées grâce aux nanotechnologies dans des entreprises et des universités promettent un changement radical dans les méthodes de conception des ordinateurs qui atteindraient ainsi des puissances de traitement et de stockage nettement supérieures à celles des ordinateurs actuels. Les pages qui suivent brossent un tableau des techniques traditionnelles et de celles en émergence.

Les nouvelles techniques de lithographie

Différentes techniques de lithographie

Pour remplacer la photolithographie optique conventionnelle dans la fabrication de circuits intégrés, de nouvelles technologies sont en cours de développement et visent l'utilisation de rayons correspondant à l'ultraviolet extrême (EUV) ou encore de rayons X. Un faisceau de particules, composé

d'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 faisceau d'électrons (EPL). Chacune de ces technologies détient des avantages et des inconvénients, que nous résumons rapidement comme suit :

La lithographie par rayons X

La lithographie par rayons X 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. Un faisceau de rayons X traverse ici un masque et expose un substrat directement, sans passer au travers de lentilles. Des groupes japonais ont récemment démontré que, malgré les difficultés qui lui sont inhérentes, la lithographie à rayons X comporterait un coût d'opération inférieur à celui des technologies EUV et EPL pour la fabrication de circuits intégrés complexes.

*Incertitude quant
à l'avenir de la
lithographie par
rayons X*

La compagnie IBM a fait figure de pionnier dans l'utilisation industrielle de la lithographie par rayons X⁷. Après avoir travaillé seule durant plusieurs années, l'entreprise reconnaissait au milieu des années 1990 ne plus être en mesure de continuer ainsi. Le consortium Sematech a organisé à l'automne 1999 un atelier en vue de déterminer les technologies en lithographie les plus prometteuses pour l'avenir : la majorité des 19 spécialistes invités ont favorisé les lithographies EUV et EPL. Cette décision a mis en péril l'avenir de la lithographie par rayons X, à tout le moins aux États-Unis.

Sematech et la carte technologique à venir⁸

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 œuvrant en lithographie, en vue d'effectuer de la recherche pré-compétitive surtout dans le domaine de la lithographie⁹. Sematech conduit elle-même des recherches de nature précompétitive; elle diffuse largement les découvertes les plus récentes du secteur auprès des entreprises et des chercheurs. Sematech cherche également, au moyen de rencontres annuelles, de conférences, etc., à établir un consensus quant à la direction probable de la technologie dans les années à venir. C'est ainsi que lors d'une rencontre tenue en septembre 2000, les principales entreprises en lithographie ont recommandé que toutes se concentrent sur le développement des technologies EPL et EUV, car la lithographie optique pourra continuer d'être employée jusqu'à 100 nm seulement. À l'échelle située entre 70 nm et 50 nm, les techniques EPL et EUV pourraient être utilisées. À celle de 35 nm, seule la technologie EUV reste possible, compte tenu de l'état des connaissances actuelles.

7 Voir Gary Styx, *Toward "Point One"*, Scientific American, February 1995.

8. Voir le site web de SEMATECH <http://www.sematech.org>

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

La lithographie aux ultraviolets extrêmes¹⁰

*La lithographie EUV
promise à un bel
avenir*

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. En octobre 2000, Intel annonçait qu'elle irait de l'avant avec la lithographie EUV pour la fabrication de sa prochaine génération de puces. Intel prévoit ainsi dessiner des circuits de 70 nm à des coûts semblables à ceux de la lithographie conventionnelle. La mise en production se fera en 2002 ou 2003.

On anticipe actuellement que la lithographie EUV permettra d'exécuter des circuits d'une taille aussi petite que 35 nm. Toutefois, elle rencontre d'importantes difficultés, notamment parce que les longueurs d'onde en cause, soit de 1 nm à 40 nm, ne sont réfractées par aucun matériau connu, de sorte que les lentilles conventionnelles ne peuvent pas être employées.

*Des applications
multiples*

Les approches qui viennent d'être esquissées ne sont que quelques-unes des technologies actuellement explorées dans le monde. En effet, des efforts importants sont déployés dans la plupart des pays européens, au Japon et même au Canada pour trouver des solutions de rechange à la lithographie conventionnelle¹¹. Il est également important de réaliser que la lithographie ne sert pas à fabriquer uniquement des microprocesseurs, mais aussi une grande variété de composants, structures et circuits intégrés destinés à d'autres applications. On pense notamment aux télécommunications, aux capteurs de toute sorte, aux circuits de contrôle d'une multitude d'appareils et de machines de notre vie quotidienne, comme l'automobile, les appareils électroménagers, les chaînes stéréo, etc.

De nouvelles avenues de recherches révolutionnaires¹²

On ne peut classer parmi les nanotechnologies les technologies de lithographie présentées précédemment.

*De nouvelles
technologies
nécessaires pour
descendre plus bas
que 30 nm*

Des recherches sont menées actuellement dans plusieurs laboratoires universitaires, gouvernementaux et au sein de grandes entreprises comme IBM ou Hewlett Packard afin de franchir la limite des 30 nm imposée aux techniques de lithographie pour la fabrication de circuits en silicium destinés aux ordinateurs. En effet, à des dimensions inférieures à 30 nm, différents effets physiques (effets quantiques) se manifestent 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 sauter d'une région à l'autre par un effet quantique appelé effet tunnel. Les recherches se multiplient pour explorer d'autres matériaux que le silicium, ou pour concevoir des composants et des circuits qui fonctionnent sur un principe différent des circuits au silicium actuels : par exemple, des composants peuvent être conçus pour

10. Voir le site web d'Intel <http://www.intel.com/labs/index.htm>

11. 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>

12. Pour une excellente présentation vulgarisée des différentes avenues de recherche, voir M. Montemerlo, J. Love et al., *Technologies and Designs for Electronics Nanocomputers*, Mitre, July 1996 disponible sur le site web http://www.mitre.org/technology/nanotech/list_of_articles.html

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. Ce dernier domaine regroupe plusieurs types de structures comme les points quantiques, les dispositifs à effet tunnel résonnant, les transistors à un seul électron et les fils quantiques.

*Coûts trop élevés
des futures usines
de circuits intégrés*

En plus des limites physiques inhérentes à la miniaturisation des transistors, une autre raison va probablement disqualifier 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 MM \$ US¹³. À ce rythme, une usine de circuits au silicium coûtera en 2010 entre 30 et 50 MM \$ US. Toute entreprise qui déciderait de construire une usine dans ce contexte prendra un risque suffisant pour menacer sa survie, quelle que soit sa taille, advenant un échec ou des difficultés majeures dans le processus de fabrication.

*L'ère des ordinateurs
n'est pas encore
arrivée*

Les ordinateurs actuels peuvent effectuer des calculs 100 millions de fois plus rapides que ne le faisait le premier ordinateur, l'ENIAC. Cependant, les prédictions théoriques de la physique fondamentale montrent qu'il serait possible de multiplier leur capacité de calcul par un milliard. Les nouveaux ordinateurs favoriseront le développement de l'intelligence artificielle ainsi que l'exploration plus rapide de nombreux champs scientifiques.

L'électronique moléculaire

Un autre domaine de recherche qui a récemment laissé entrevoir des résultats très prometteurs est celui de l'électronique moléculaire. Si les résultats attendus se concrétisent, il sera possible de construire des ordinateurs radicalement différents de ceux produits grâce à la lithographie.

*Molécules chimiques
et biologiques comme
composants
d'ordinateurs*

Plusieurs chercheurs travaillent actuellement à l'utilisation de molécules chimiques ou biologiques comme transistor qui est le composant de base d'un ordinateur. Des molécules pourraient servir d'interrupteurs au courant électrique. En effet, lorsque soumises à un courant électrique, certaines molécules changent de forme après absorption d'un électron et reprennent leur forme initiale après son relâchement. Autrement dit, elles peuvent représenter 0 ou 1 d'après leur forme, ce qui constitue le principe fondamental d'un transistor et donc d'un ordinateur. Un transistor moléculaire offrirait l'avantage d'être « nanotechnologique », ce qui permettrait d'en installer un nombre beaucoup plus grand dans un même espace, de réduire la distance les séparant les uns des autres et d'accélérer par le fait même la vitesse de traitement des données. Un ordinateur ainsi conçu pourrait fonctionner des milliers de fois plus rapidement qu'un ordinateur conventionnel.

13. Dans l'ensemble du texte, à moins qu'il ne soit précisé que ce sont des dollars américains, les données sont en dollars canadiens.

Des ordinateurs fonctionnant malgré des pièces défectueuses

À l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), les chercheurs ont mené récemment des travaux permettant de synthétiser une molécule agissant comme un commutateur. Ils s'intéressent à des molécules comme les catenanes et les rotaxanes, qui peuvent être produites avec les moyens traditionnels de la chimie de synthèse. Il serait donc possible de fabriquer des transistors, des commutateurs et des résistances de façon peu coûteuse. Les chercheurs espèrent pouvoir un jour créer des circuits en déposant les molécules sur une plaque de plastique par exemple, pour qu'elles s'assemblent d'elles-mêmes par la suite et forment un réseau. Evidemment, un tel réseau comportera inévitablement des erreurs, contrairement aux puces fabriquées par la lithographie conventionnelle, dont les défauts sont l'exception. Ces ordinateurs devraient donc pouvoir fonctionner avec des pièces défectueuses. Le TERAMAC¹⁴, un ordinateur conçu par Hewlett Packard (HP), 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, il résolvait des problèmes 100 fois plus vite qu'un autre ordinateur. En effet, son architecture ouverte permet à l'information de prendre plusieurs chemins différents. Il devient donc possible d'assembler des ordinateurs à partir de pièces nanométriques qui ne seraient pas toutes forcément identiques, ce qui en simplifie d'autant 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 de 16 bits, mémoire qui occuperait un carré de 100 par 100 nm, puis d'ici une dizaine d'années bâtir un ordinateur uniquement à partir de composants moléculaires, dont la capacité de mémoire serait multipliée par un facteur de 1 000.

Les futurs ordinateurs assemblés à partir de méthodes chimiques

Les futurs ordinateurs seront donc totalement différents des appareils actuels. La fabrication des composants électroniques moléculaires se rapprochera davantage des processus des compagnies pharmaceutiques. Les composants seront déposés sur un substrat et s'assembleront d'eux-mêmes, réduisant le nombre d'opérations de façon draconienne. Les premières applications de l'électronique moléculaire devraient apparaître dans le domaine de la mémoire moléculaire.

Dans plusieurs cas, les développements en électronique moléculaire se sont révélés plus rapides que ce qu'anticipaient les chercheurs eux-mêmes. 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 à celui des ordinateurs classiques.

14. Voir Computing after Silicon, Technology Review, September-October 1999.

Les dispositifs nanoélectroniques à l'état solide

De nombreuses approches en cours d'exploration

Les quelques exemples mentionnés ci-dessus ne composent pas une liste exhaustive. Bien d'autres recherches se poursuivent actuellement sur de nouveaux mécanismes et de nouvelles façons de concevoir un ordinateur : les dispositifs à effet tunnel résonnant, les points quantiques, les transistors à un seul électron et, enfin, les fils quantiques.

Une difficulté : comment relier les transistors entre eux

La plupart des dispositifs en question se heurtent à une même difficulté, celle de se connecter entre eux pour exécuter des circuits. Les relier par des fils métalliques conventionnels ne sera pas possible parce que la proximité des fils pousse les électrons à 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 leur diamètre diminue. Enfin, ils risquent également de chauffer et de casser après un nombre restreint d'heures de fonctionnement.

En somme, d'énormes obstacles devront être franchis pour que des ordinateurs disposant de 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, elles ne trouveront jamais preneur parce qu'une technologie différente mais tout aussi efficace aura été mise au point et adoptée plus rapidement par les principaux fabricants.

Risque élevé des recherches en cours

Quelques remarques supplémentaires s'imposent, avant de conclure cette sous-section. Premièrement, les développements technologiques évoluent très rapidement. Il s'agit d'une véritable course où parfois chaque mois compte. Deuxièmement, les infrastructures de recherche requises coûtent cher : chaque année, des milliards de dollars américains sont investis par les entreprises dans le domaine de la recherche en électronique. Enfin, il existe une certaine complémentarité entre les recherches menées sur les semi-conducteurs et celles d'autres secteurs. En effet, les méthodes de fabrication des MEMS¹⁵ (microelectromechanical systems ou micro-systems) par exemple, utilisent la lithographie. La recherche en électronique peut donc se développer en parallèle avec celles sur les MEMS, puisque les deux nécessiteront le même équipement et en partie la même expertise.

15. Les MEMS font partie des microsystèmes. La technologie des microsystèmes désigne les systèmes technologiques dont la dimension est inférieure à un millimètre. Leur dimension peut varier d'un micromètre (soit 1000 nm) à quelques centaines de micromètres. Les microsystèmes intègrent différents éléments technologiques comme des senseurs et des actuateurs. Les microsystèmes font appel à plusieurs technologies différentes telles la micro-optique, la micro-mécanique, la biochimie, la micro-électronique, la technologie des microfluides (microfluidics), etc. Les applications des microsystèmes sont encore relativement peu nombreuses. Mentionnons les micro-accéléromètres employés dans les automobiles pour déclencher les sacs gonflables lors d'un impact. Plusieurs de ces microsystèmes sont fabriqués en ayant recours aux techniques de lithographie sur silicium. On les appelle alors des MEMS (microelectromechanical systems). Le lecteur intéressé peut consulter *Microsystem Technology : Exploring Opportunities*, Netherlands Centre for Technological Trends, 1994.

1.4 Les nanobiotechnologies¹⁶

La nanobiotechnologie ou l'approche bottom up

La nanobiotechnologie (ou nanobioscience comme certains l'appellent) est un exemple parfait d'une approche ascendante (*bottom up*) lorsque 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 requiert l'étude et la manipulation de la matière au niveau nanométrique. En effet, une molécule d'ADN n'a que 2 nm de large, alors que les virus mesurent entre 10 et 100 nm. Cependant, en règle générale, les biotechnologistes ne se considèrent pas comme travaillant en nanotechnologies. Par contre, d'autres chercheurs qui ne sont ni biologistes, ni chimistes, notamment des ingénieurs et des physiciens, estiment que leur travail fait partie des nanotechnologies lorsqu'ils l'appliquent aux biotechnologies. Il n'est donc pas facile de définir la nanobiotechnologie. Un critère important concerne l'utilisation de nanomatériaux ou encore la création de nouveaux instruments ou appareils fonctionnant à l'échelle nanométrique, dans le champ de la biotechnologie. En fait, il s'agit d'un champ faisant appel aux microtechnologies et aux méthodes traditionnelles de la chimie synthétique macromoléculaire. Quoi qu'il en soit, la distinction risque de devenir de plus en plus ténue parce que la nanobiotechnologie sera progressivement intégrée à la biotechnologie proprement dite.

La sous-section qui suit présente les principaux domaines de recherche en nanobiotechnologie, secteur très embryonnaire dont les applications sont encore restreintes, voire extrêmement rares dans le champ des « nanotechnologies pures ». Les exemples retenus relèveront d'une définition plutôt extensive du secteur.

Senseurs chimiques et biosenseurs

Des biosenseurs plus efficaces

Les méthodes traditionnelles pour déterminer la présence et la concentration d'une molécule chimique ou d'un agent biologique sont relativement lourdes, lentes et coûteuses. Mais, 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 des biosenseurs et des senseurs chimiques est en pleine effervescence.

Des progrès rapides

Grâce aux nanotechnologies, les progrès sur ce front 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, après dix ans d'efforts et un investissement de 27 M \$ US, à la mise au point d'un biosenseur extrêmement efficace, construit au moyen d'interrupteurs à canal d'ions mesurant 1,5 nm. Lorsque les récepteurs capturent la molécule ciblée, ils bloquent le passage des ions et entraînent une diminution du courant électrique qui permet de la détecter dans l'échantillon. En fait, ce senseur est si sensible qu'un cube de sucre jeté dans le port de Sydney serait

16. En sus des documents mentionnés précédemment, le rapport MHSS 2020, Focused Study on Biotechnology & Nanotechnology, July 29, 1997, produit par SRA International, présente plusieurs exemples d'applications des nanobiotechnologies.

détecté. Les droits de commercialisation ainsi que la propriété intellectuelle du capteur ont été accordés à la compagnie Ambri Pty Ltd., qui emploie 59 personnes à temps plein, dont son inventeur, et qui travaille actuellement à la mise au point de ses multiples applications. 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, de la défense (détection d'armes biologiques) ainsi que le secteur vétérinaire sont autant de secteurs visés. Par exemple, le capteur pourra détecter la présence de pathogènes comme la bactérie *E. Coli*, l'anthrax, la peste, celle de molécules comme la Digoxin ou encore de l'hormone produite par une femme enceinte.

*Des résultats en
cinq minutes*

Ambri pense produire et distribuer ses premiers capteurs au cours de l'année 2001. Ces biosenseurs pourront tenir dans la paume de la main et produiront des résultats en cinq minutes, ce qui sera particulièrement apprécié des médecins, cliniques et hôpitaux. De plus, un test coûtera environ un dollar. Les marchés ciblés par Ambri offrent un potentiel de plusieurs centaines de millions de dollars.

Des nanobiotechnologies permettant de déjouer le système immunitaire

*Les
nanobiotechnologies
au secours des
diabétiques*

Implanter de nouvelles cellules en mesure de remplacer les cellules défectueuses du pancréas permettrait de soigner les diabétiques. Cependant, les cellules utilisées actuellement proviennent du porc et le système immunitaire les rejette automatiquement. Le professeur Mauro Ferrari a cependant trouvé le moyen d'introduire des cellules sans que celles-ci se fassent attaquer¹⁷. Des cellules pancréatiques porcines sont encapsulées dans des puces au silicium qui forment une membrane aux pores tellement petits (moins de 18 nm) que les anticorps ne peuvent la traverser. La membrane laisse toutefois passer le sucre et les autres fluides pour nourrir la cellule et lui permettre de remplir ses fonctions normales. La puce au silicium est insérée sous la peau. Des cellules pancréatiques de porc ont déjà été implantées avec succès sur des souris. La prochaine étape visera des animaux de plus grande taille, comme le chien. Si cette étape est franchie avec succès, les essais subséquents porteront sur des sujets humains.

Une ancienne étudiante du professeur Ferrari cherche à utiliser la même technologie pour soigner les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. Des cellules normales seraient ainsi implantées dans le cerveau pour produire des neurotransmetteurs appelés à remplacer les cellules endommagées.

Un système pour séparer plus rapidement les fragments d'ADN

*Une nouvelle
technologie
d'identification de
l'ADN plus efficace*

La méthode traditionnelle de segmentation de l'ADN utilise des gels et est assez laborieuse. Des chercheurs de l'Université Cornell ont récemment découvert une nouvelle méthode qui a recours à ce qu'ils appellent un gel artificiel, à savoir un appareil de 3,5 nm de long, fait de silicium, dans lequel sont gravés des milliers de tunnels de 100 nm de large. Son fonctionnement est identique à celui des gels traditionnels : après avoir fragmenté l'ADN avec des enzymes, les fragments sont libérés dans une

17. Voir Technology Review, *Nanomedicine Nears the Clinic*, January-February 2000.

solution aqueuse à une extrémité de l'appareil. Puis un courant électrique est appliqué à l'autre extrémité, ce qui a pour effet de pousser les fragments d'ADN à traverser les tunnels. Or, les fragments ne voyagent pas tous à la même vitesse, les fragments plus gros se déplaçant plus rapidement. Comme ils sont identifiés au moyen de marqueurs fluorescents, ils peuvent être localisés au fur et à mesure qu'ils progressent soit dans le gel traditionnel, soit dans le gel artificiel. Si les résultats obtenus sont les mêmes avec les deux méthodes, le gel artificiel présente l'avantage de ne prendre qu'une quinzaine de minutes pour identifier les fragments d'ADN, contre 12 à 24 heures pour les gels traditionnels. De plus, les gels artificiels permettent de récupérer facilement les fragments d'ADN, ce qui n'est pas le cas des 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.

La biomimétique ou l'autoassemblage de la matière

*Chercher à imiter
la nature*

Les cellules, les protéines, les acides aminés et l'ADN, composantes de base de la vie, fascinent plusieurs chercheurs en nanotechnologies, car la nature a toujours fonctionné à l'échelle nanométrique. Les fameux assembleurs imaginés par Drexler sont en opération à l'intérieur de chaque cellule puisque celle-ci a la capacité de reproduire d'autres cellules identiques grâce au bagage génétique qu'elle contient. Chacune dispose d'outils 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. Des chercheurs espèrent éventuellement être en mesure de répliquer les mécanismes opérant dans les cellules.

*Un moteur
moléculaire
combinant
l'organique et
l'inorganique*

Ainsi, Carl Montemagno, de l'Université Cornell, a conçu un moteur moléculaire qui s'inspire de la flagelle d'une bactérie. Il a constaté qu'une flagelle est formée d'une protéine entourée de six autres protéines et ressemble à une queue minuscule qui s'agitait dans l'eau pour propulser la bactérie. Les protéines transforment des molécules en énergie, puis en mouvement. Le chercheur a réussi à les greffer à des pièces inorganiques sur une surface micromachinée en nickel. Il a donc réussi à produire un moteur hybride nanométrique, en combinant des pièces organiques et inorganiques. Les utilisations éventuelles sont nombreuses, par exemple la propulsion de machines nanométriques à l'intérieur du corps humain, mais elles sont probablement éloignées dans le temps.

Des champs de recherche infinis et stimulants

Les cas que nous venons de présenter sur la nanobiotechnologie ne donnent que quelques exemples parmi les plus connus des domaines de recherche et des applications possibles. Les efforts ont littéralement explosé dans plusieurs laboratoires universitaires et, ce, tant aux États-Unis qu'au Japon ou en Europe.

1.5 Les instruments nécessaires aux nanotechnologies¹⁸

*Des microscopes qui
permettent de voir et
de manipuler les
atomes*

Pour se développer, les nanotechnologies ont besoin d'une instrumentation particulière. En fait, leur essor véritable est venu de l'invention du microscope STM (Scanning Tunneling Microscope) en 1981. En effet, les microscopes optiques conventionnels ne permettent pas de voir à un niveau inférieur à celui de la longueur d'onde de la lumière qui varie entre 380 et 780 nm. Certes, les microscopes à rayons X ou électroniques peuvent se rendre dans certains cas jusqu'à 0,1 nanomètre. S'ils demeurent donc très utiles pour étudier la matière inerte, ils sont incapables de visualiser la matière vivante. De plus, contrairement aux microscopes STM, ils ne peuvent servir à manipuler la matière. D'autres microscopes ont été développés par la suite, par exemple le Scanning Probe Microscope (SPM), mais le STM offre l'immense avantage de pouvoir manipuler la matière en plus de l'imager.

Le microscope STM

*Principe de
fonctionnement d'un
microscope STM*

Depuis son invention en 1981, le STM s'est largement répandu dans l'ensemble des laboratoires universitaires et industriels. Son fonctionnement se compare à celui d'un tourne-disque traditionnel utilisant des disques de vinyle. En effet, la pointe du microscope effleure littéralement la surface du matériau observé, sans y toucher toutefois, et comme l'aiguille du tourne-disque dans un sillon, se déplace vers le haut ou le bas en suivant le contour des atomes. La pointe a souvent la dimension d'un seul atome et frôle la surface étudiée, s'en approchant en moyenne de 0,7 nm.

Son fonctionnement consiste à appliquer un faible courant électrique, de l'ordre d'un nanoampère (nA), au spécimen à l'étude, de telle sorte que les électrons peuvent circuler entre la pointe et la surface. Comme ce courant est infiniment sensible à la distance, si la pointe se rapproche d'à peine 0,3 nm de la surface, le courant augmente mille fois. Mesurer ce courant, autrement dit mesurer le passage d'électrons entre la pointe et la surface, permet de calculer la distance qui les sépare. Un ensemble piézo-électrique sophistiqué permet de maintenir la distance constante de façon que la pointe se soulève lorsqu'elle se trouve vis-à-vis d'un atome et qu'elle s'abaisse lorsqu'elle est entre deux atomes. Le microscope STM est relié à un ordinateur qui enregistre tous ces mouvements et reproduit ainsi la surface étudiée. Pour tracer l'ensemble de la surface, il suffira de déplacer la pointe en ligne droite, puis de la déporter légèrement vers la gauche ou la droite et de recommencer ainsi jusqu'à ce que toute la surface soit couverte. L'ordinateur tracera une image de l'ensemble à partir des informations obtenues.

18. Pour un bon exposé sur les instruments, voir chapitre 5 de *Nanotechnology, Towards a Molecular Construction Kit*, op. cit. ainsi que *A Positron Named Priscilla*, National Academy Press, Washington, 1994 pour un exposé détaillé du fonctionnement d'un microscope STM.

Les premiers microscopes STM devaient fonctionner sous vide et étaient très sensibles aux vibrations et aux variations de température. Perfectionnés, ils peuvent maintenant fonctionner dans une atmosphère normale, voire dans un liquide. Des efforts sont encore nécessaires pour qu'ils puissent fonctionner dans des environnements spéciaux.

Comment déplacer un seul atome à la fois

Le STM peut non seulement servir à étudier une surface, mais également à déplacer individuellement des atomes, un exploit plutôt spectaculaire. Pour y parvenir, il faut rapprocher la pointe du microscope de l'atome à déplacer, faire adhérer celui-ci au moyen d'un courant électrique, soulever la pointe et la déplacer à l'endroit choisi, l'abaisser près de la surface ciblée, puis diminuer le courant pour que l'atome se dépose. Cette méthode a permis de produire des images impressionnantes comme le logo d'IBM ou encore l'image dite du corail quantique, composée de 48 atomes de fer déposés sur une surface de cuivre pour former un cercle parfait. La page couverture du présent avis¹⁹ reproduit le corail en question. Ces images ont certes fait le tour du monde, mais les microscopes STM ne sont pas près de former des nanomachines assemblées atome par atome. Il faudrait 13 milliards d'années pour constituer une seule feuille de papier, même avec un appareil pouvant déplacer un million d'atomes à la seconde.

Le microscope AFM

Atomic Force Microscopy

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

Un microscope utile aux biologistes

Plusieurs versions modifiées du AFM sont apparues sur le marché. Elles sont utilisées de plus en plus couramment par les biologistes cellulaires. En effet, le microscope AFM se révèle supérieur aux techniques usuelles pour l'étude de plusieurs phénomènes cellulaires.

Le Scanning Near-field Optical Microscopy (SNOM)

Le SNOM : très utile dans plusieurs domaines de recherche

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. Il est à la fois 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. Il offre donc un grand potentiel pour l'analyse du matériel cellulaire ainsi que pour la détection de l'organisation moléculaire des membranes.

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

En ce moment, les différents microscopes AFM et STM sont employés couramment dans l'industrie des semi-conducteurs (en particulier dans l'entreposage magnétique de données) ainsi que dans les industries chimique et optique. Les biologistes les utilisent de plus en plus pour l'étude des processus biologiques en temps réel au niveau nanométrique.

1.6 La modélisation et la simulation

Les nanotechnologies font un usage intensif de la modélisation et des simulations par ordinateur²⁰. En effet, les chercheurs ont souvent recours à une simulation par ordinateur avant de mener une expérience, cela afin d'optimiser la conception d'une molécule plutôt que de procéder par tâtonnement. Les simulations permettent également de sauver du temps et d'augmenter la fiabilité de nouveaux appareils nanométriques. En fait, les chercheurs doivent utiliser de façon interactive deux approches, l'expérimentation et la modélisation, chacune permettant de comprendre et de confirmer les résultats de l'autre.

Des ordinateurs plus puissants nécessaires

Cependant, des progrès substantiels restent à faire pour développer des ordinateurs assez puissants et des logiciels de simulation capables de faire des simulations aussi poussées. En effet, la mécanique quantique est éminemment complexe. Au fur et à mesure que le nombre d'atomes en interaction augmente, la complexité s'accroît de façon exponentielle. Et même les ordinateurs les plus puissants actuellement sur le marché sont incapables de résoudre des simulations comportant un nombre un tant soit peu élevé d'atomes. Les chercheurs doivent donc concevoir des modèles permettant de simplifier la réalité. Des percées sont à faire à cet égard dans la conception d'algorithmes de simulation et de logiciels, par exemple des simulations utilisant massivement des capacités de traitement parallèle. Il va de soi que des ordinateurs plus puissants seront également nécessaires.

Des progrès évidents dans les simulations de la matière par ordinateur

Les calculs en mécanique quantique et en modélisation et simulation par ordinateur ont progressé rapidement au cours des vingt dernières années. Après l'adoption du High Performance Computing Act en 1991, les États-Unis ont investi 1 MM \$ US par an dans l'acquisition d'ordinateurs à haute performance et dans le développement d'algorithmes et de logiciels. Ils ne sont pas les seuls. D'autres groupes dans le monde, surtout en chimie et en physique, travaillent à la conception d'algorithmes de calcul à l'échelle quantique. Leurs efforts se traduisent dans des logiciels rapidement commercialisés par des entreprises. Le cas des modélisations moléculaires est plus complexe, car les objectifs et les disciplines visés sont très nombreux : les nouvelles méthodes de simulation et les codes de modélisation diffèrent beaucoup d'un groupe à l'autre. De plus, les interfaces graphiques, lorsqu'elles existent, sont peu conviviales et non standardisées, ce qui décourage les entreprises d'en exploiter les résultats sur une base commerciale.

20. Voir Chapitre 2 de Investigative Tools : Theory, Modeling and Simulation dans *Nanotechnology Research Directions, IWGN Workshop Report*, op. cit.

1.7 Les constats généraux

Avant de clore ce survol des grands domaines d'application des nanotechnologies, il vaut la peine de rassembler l'information colligée sous la forme de constats généraux.

- Les possibilités d'applications des nanomatériaux sont pratiquement infinies. Aucun secteur industriel ne sera à l'abri de l'influence des nouveaux matériaux. Les nanotubes de carbone sont particulièrement intéressants et vont sans doute s'imposer par une multitude d'applications révolutionnaires au cours des décennies à venir.
- Cependant, force est de constater que les nanomatériaux ne sont pas encore rendus à une étape commerciale. Leurs coûts de fabrication demeurent très élevés par rapport à ceux des matériaux conventionnels, sans que leurs propriétés ne viennent compenser l'écart monétaire observé, du moins pas pour le moment.
- Bien que les recherches sur les nanotechnologies se soient beaucoup intensifiées au cours des deux dernières années, le domaine est encore en partie vierge. Il reste une foule de connaissances à acquérir pour découvrir les propriétés des matériaux, apprendre à les manipuler, les entreposer, les produire de façon économique, etc.
- En électronique, plus particulièrement dans le domaine des ordinateurs, la lithographie conventionnelle va bientôt rencontrer un obstacle infranchissable. Les lithographies EUV, EPL et autres permettront d'en étirer la vie d'environ une dizaine d'années. En 2015 au plus tard, seul un changement de paradigme dans la façon de fabriquer les semi-conducteurs permettra de poursuivre la miniaturisation des composants d'ordinateurs. Cependant, les recherches effectuées au sein d'entreprises, laboratoires publics et centres universitaires préparent une révolution de cet ordre, fondée sur des ordinateurs moléculaires plus puissants et pas plus coûteux que les ordinateurs actuels. Dans ce secteur, les nanotechnologies remplaceront les technologies connues.
- En biotechnologie, les nanomatériaux et les nanotechnologies ont déjà permis d'accélérer la recherche. Il faut rappeler ici qu'en biotechnologie, les nanotechnologies sont souvent combinées avec les MEMS.
- Les frontières entre domaines deviennent plus floues, notamment entre la matière organique et la matière inorganique. Par exemple, des ordinateurs moléculaires pourraient éventuellement être construits grâce à l'ADN. Des micro-appareils, par exemple des MEMS, combinent des cellules ou des nanoparticules d'êtres vivants et une matière inorganique comme les puces au silicium. On assiste à la convergence de technologies autrefois complètement distinctes, en particulier l'électronique et la biotechnologie.

- L'instrumentation, notamment les nouveaux microscopes, s'est révélée essentielle au développement des nanotechnologies. Si elle a atteint une certaine maturité, de nouvelles recherches demeurent nécessaires pour concevoir des instruments adaptés aux conditions spécifiques d'expérimentation envisagées.
- Enfin, les simulations par ordinateur sont indispensables aux nanotechnologies; elles nécessitent des ordinateurs extrêmement puissants ainsi que de nouveaux logiciels de simulation.

La recherche sur les nanotechnologies aux États-Unis, en Europe et au Japon

Le présent chapitre trace un portrait sommaire de la recherche réalisée dans le domaine des nanotechnologies principalement aux États-Unis, mais également en Europe et au Japon. Seront ainsi vus les montants consacrés à la recherche sur les nanotechnologies, les sources majeures de financement, les principaux acteurs ainsi que les modes de structuration de cette recherche.

2.1 La recherche aux États-Unis

En 1997, le gouvernement fédéral américain, par l'intermédiaire de plusieurs de ses ministères ou agences, a investi 116 M \$ US en recherches sur les nanotechnologies. Le budget qu'il y consacre a grimpé très rapidement, pour atteindre 422 M \$ US en 2001. Le tableau 3 décrit la provenance des fonds gouvernementaux entre ces deux dates.

Tableau 3
Sources gouvernementales de financement de la recherche sur les nanotechnologies, 1997-2001, millions de dollars US.

Agence ou ministère	1997	1999	2000	2001
National Science Foundation	65	85	97	150
Ministère de la Défense	32	70	73	110
Ministère de l'Énergie	7	58	58	93
NASA	3	5	5	20
Ministère du Commerce/NIST	4	16	8	10
National Institute of Health	5	21	32	39
Total	116	255	270	422

Source : M.C. Roco, *Charge to the workshop as part of the NNI Implementation Plan, Partnership in Nanotechnology, NSF Grantees Conference, January 29-30, 2001.* Disponible sur le site <http://www.nano.gov>

Principaux bailleurs de fonds en nanotechnologies aux États-Unis

La National Science Foundation (NSF), le ministère de la Défense et le ministère de l'Énergie sont les principaux bailleurs de fonds. Les données pour l'année 2001 reflètent l'initiative que le président Clinton a annoncée en février 2000. Celui-ci proposait d'accorder un budget de 495 M \$ US à la recherche en nanotechnologies, mais le Congrès a réduit ce montant à 422 M \$ US. Il s'agit tout de même d'une hausse de 152 M \$ US, donc de 56 %, par rapport à l'année 2000, et de 264 % par rapport à 1997. Ces hausses magistrales témoignent de l'importance que le gouvernement reconnaît aux retombées éventuelles du secteur en santé, en défense, en environnement, en informatique, en énergie, etc.

Financement des entreprises

Il n'existe pas véritablement de données sur la contribution financière des entreprises. Cependant, un groupe de travail mis sur pied par la NSF estimait qu'en 1997 les entreprises américaines avaient investi autant que le gouvernement fédéral, soit environ 110 M \$ US. Ce sont surtout les grandes entreprises du secteur de l'électronique, c'est-à-dire HP, Texas Instruments, IBM, Xerox, Motorola, Lucent, etc. qui y consacrent les plus grosses sommes. À l'extérieur du secteur de l'électronique, seules trois

grandes entreprises, Dow, Dupont et Eastman Kodak, y allouent des montants substantiels. De petites entreprises, dont la contribution sera décrite plus loin, sont présentes aux États-Unis.

Les universités américaines sont les principaux récipiendaires des fonds gouvernementaux destinés aux recherches sur les nanotechnologies puisqu'elles en accaparent 70 %. En effet, même le ministère américain de la Défense, qui effectue des recherches importantes dans ses laboratoires, réserve une partie de ses fonds aux universités, notamment via la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA).

La NSF : principal bailleur de fonds de la recherche en nanotechnologies

Au cours des dernières années, la NSF a consacré des sommes considérables à l'expansion ou à l'établissement de plusieurs centres de recherche sur les matériaux, les Materials Research Science and Engineering Centers (MRSEC); au nombre de 29 en 2000, ils ont reçu un budget annuel de 52,5 M \$ US. De ces 29 centres, 16 consacraient une partie appréciable de leurs programmes de recherche à l'étude de matériaux à l'échelle nanométrique, comme en témoigne le tableau 4. Le premier de ces centres est né au milieu des années 1980; plusieurs existent donc depuis au moins 10 ans.

Tableau 4
Materials Research Science and Engineering Centers impliqués dans des recherches sur les nanotechnologies, 2000

Université Brown-Micro and Nanomechanics of Electronic and Structural Materials	Le centre poursuit des études théoriques et expérimentales sur la micro et la nanomécanique de matériaux électroniques et structuraux.
MIT – Center for Materials Science and Engineering	Le centre poursuit des programmes d'étude largement pluridisciplinaires sur les matériaux photoniques, les polymères nanostructurés, le comportement de phase (phase behavior), les interfaces oxydées et les oxydes métalliques de transition.
Université Northwestern-Materials Research Science and Engineering Center	Le centre poursuit plusieurs projets de recherche principalement ceux portant au niveau nanométrique, par exemple des matériaux nanostructurés pour les senseurs biologiques et chimiques, les oxydes complexes pour les couches minces de céramique, la synthèse et le processus de nouveaux polymères bénins pour l'environnement, etc.
Université Columbia-Mixed Organic/Inorganic Materials and Structured Thin Films	La recherche vise le développement de la science et la technologie des couches minces formées par des arrangements de nanocristaux avec des matériaux polymériques et organiques.
Université Cornell-Center for Materials Research	Le centre poursuit plusieurs grands domaines de recherche en vue d'obtenir une connaissance fondamentale des matériaux ordonnés et désordonnés au niveau nanométrique afin d'être en mesure de développer une maîtrise de ces matériaux pour des applications diverses.
Université Harvard-Materials Research Center	Le centre vise les nouveaux matériaux (superconducteurs et extrêmement résistants), les interfaces et les nanostructures électroniques et photoniques.
Université Johns Hopkins-Center on Nanostructured Materials	Le centre effectue des recherches fondamentales sur les nanostructures magnétiques susceptibles d'être importantes technologiquement.

Tableau 4 (suite)**Materials Research Science and Engineering Centers impliqués dans des recherches sur les nanotechnologies, 2000**

Université du Kentucky- <i>Advanced Carbon Materials Center</i>	Le centre poursuit des recherches sur la synthèse, la caractérisation et le développement d'applications sur les matériaux à base de carbone, y compris les nanotubes de carbone, les fibres de carbone ainsi que les nanotubes et les composés de fullerènes.
Université du Maryland, College Park- <i>Materials Research Science and Engineering Center</i>	Ce centre, en collaboration avec l'Université Rogers, réalise des recherches sur des problèmes reliés à la dynamique des couches minces ferroélectriques et des surfaces nanostructurées ainsi que sur les propriétés d'oxydes magnétiques hautement polarisées.
Universités de l'Oklahoma et de l'Arkansas- <i>Center for Semiconductor Physics in Nanostructures</i>	Le programme de recherche est axé sur la science et les applications reliées aux nanostructures semiconductrices.
Université de Pennsylvanie- <i>Laboratory for Research on the Structure of Matter</i>	Le programme interdisciplinaire comprend l'investigation de matériaux fonctionnels biomoléculaires, de matériaux et de structures dérivés des nanotubes de carbone, de matériaux mous microscopiques et d'oxydes complexes multifonctionnels.
Université d'État de Pennsylvanie- <i>Center for Porous Hosts</i>	Les recherches du centre portent sur les effets collectifs moléculaires, photoniques et électroniques qui émergent de systèmes nanoporeux à l'échelle nanométrique dans des connectivités à une, deux ou trois dimensions.
Université Princeton- <i>Center for Complex Materials</i>	Les thèmes de recherche touchent au transport électronique, aux matériaux mous macromoléculaires (en collaboration avec des chercheurs industriels) ainsi qu'aux couches minces organiques.
Université Stanford/IBM- Almaden/Université Davis de Californie- <i>Center for Polymer Interfaces and Macromolecular Assemblies</i>	Ce centre regroupe deux universités avec le centre de recherche d'IBM à Almaden. La recherche porte sur la compréhension des couches minces organiques. Les applications potentielles de ces recherches comprennent des appareils optiques et électro-optiques, la lubrification et l'adhésion.
Université de Virginie- <i>Center for Nanoscopic Design</i>	Le centre poursuit des recherches pour comprendre les processus de croissance des surfaces semiconductrices dans le but d'assembler des structures parfaites au niveau nanométrique.
Université Madison du Wisconsin- <i>Nanostructured Materials and Interfaces</i>	La recherche cible les mécanismes associés à l'intégration des matériaux sur le silicium, l'investigation des grains dans des superconducteurs à températures élevées et le rôle des surfaces nanostructurées sur la croissance et le comportement des systèmes biologiques tels que les virus et les bactéries.

Source : Site web de la NSF <http://www.nsf.gov/mps/dmr/mrsec.htm>

De plus, quatre universités possèdent des centres spécifiquement voués aux nanobiotechnologies et qui sont également financés par la NSF. Elles sont énumérées au tableau 5. Fait à remarquer, la création de ces centres est toute récente, le premier datant de 1997.

Tableau 5
Centres universitaires de recherche en nanobiotechnologies, 2000

University of Michigan Medical School-Center for Biologic Nanotechnology (1998)	Le centre effectue des recherches sur les dendrimères pour la thérapie génique et la délivrance de médicaments contre le cancer.
Université de Washington-Center for Nanotechnology (1997)	Les recherches touchent à la délivrance de médicaments, aux nanomatériaux et au séquençage d'ADN.
Université Cornell-Nanobiotechnology Center (1999)	La recherche porte sur les interfaces entre la biologie et les nanotechnologies.
Université d'État de l'Ohio-Biomedical Engineering Center (1999)	Les recherches portent sur les membranes pour la transplantation cellulaire et la délivrance de médicaments.

Les nanotechnologies dans quelques grandes universités américaines

La meilleure façon d'illustrer le développement rapide de la recherche sur les nanotechnologies dans les universités américaines consiste à explorer le cas de quelques universités à l'avant-garde du secteur, de manière à dégager les tendances en cours au sein du système universitaire américain. Il s'agit des universités Cornell, Harvard, d'Illinois à Urbana-Champaign, de Californie à Los Angeles (UCLA) et à Santa Barbara (UCSB).

*Un nouveau centre
voué aux
nanotechnologies*

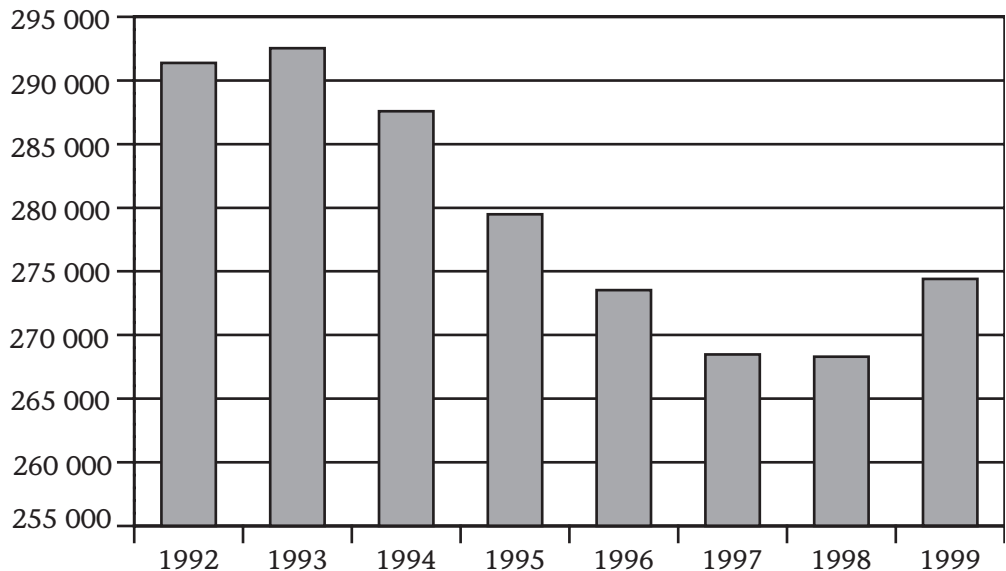
Au printemps de 2001, l'Université Cornell entreprend la construction sur son campus d'un édifice au coût de 58,5 M \$ US, près de la faculté d'ingénierie. Ce complexe est original car il regroupera trois centres actuellement dispersés sur le campus, le Cornell Nanofabrication Facility, le Nanobiotechnology Center et le Cornell Center for Materials Research. En effet, au cours des dernières années, les interactions entre ces trois centres allaient sans cesse en croissant. Ce complexe aura à développer rapidement de nouveaux matériaux pour la biologie, pour l'optique et pour l'électronique et à favoriser des interactions quotidiennes entre les ingénieurs, les physiciens, les chimistes et les biologistes. Un des domaines majeurs de recherche portera sur les MEMS. Les installations sont coûteuses, car la programmation nécessite un équipement sophistiqué, notamment des chambres blanches, qui viendra compléter ceux détenus dans les domaines de la lithographie, de la nanobiotechnologie et des MEMS.

Stratégie : attirer les meilleurs chercheurs

L'Université Cornell cherche par ce complexe, non seulement à rapprocher ses équipes de recherche, mais aussi à attirer les meilleurs professeurs-chercheurs et les meilleurs étudiants, car la concurrence est vive entre les universités américaines. Celles-ci sont aux prises avec une baisse des inscriptions en science et en génie, de même qu'avec une diminution du nombre de docteurs dans ces secteurs, ce qui accentue leur besoin d'attirer les étudiants, y compris de l'étranger.

Graphique 2

Nombre d'étudiants effectuant des études dans des disciplines scientifiques aux États-Unis, 1992-1999



Source : National Science Foundation, <http://www.nsf.gov/sbe/srs>

Les universités américaines en vive concurrence entre elles

À l'Université Harvard, le Materials Research and Engineering Center regroupe 26 professeurs des départements de génie, de physique, de chimie, de biologie ainsi que de la faculté de médecine. Ses équipements sont impressionnants et coûteux. Cela va de chambres blanches pour la microfabrication à des microscopes électroniques, STM et AFM, à des laboratoires pour effectuer la déposition de couches minces sur des matériaux, etc. De plus, dès ses débuts, le MRSEC a établi une entente avec un centre de recherche du Massachusetts Institute of Technology (MIT) pour un accès réciproque à leurs équipements. Le MRSEC accueille également des chercheurs de l'industrie et d'autres universités.

Implication du fonds de dotation de l'Université Harvard

Le MRSEC va bientôt prendre de l'expansion grâce à un investissement de 30 M \$ US provenant du fonds de dotation de l'Université (le mieux pourvu des États-Unis avec 13 MM \$ US). Le MRSEC changera de nom pour devenir le Center for Imaging and Mesoscale Structures. Ce centre interdisciplinaire occupera 4 500 mètres carrés et permettra la nanofabrication et la synthèse de matériaux. On pourra y faire de la visualisation (imaging) de structures cellulaires, de protéines, etc. Le centre sera construit entre les bâtiments actuels des facultés de physique, de chimie et de génie de façon

à favoriser et à faciliter au maximum les interactions entre leurs chercheurs. Un but explicite de cet investissement est d'attirer davantage d'étudiants et les meilleurs professeurs.

*Institut Beckman
en Illinois*

L'Institut Beckman a ouvert ses portes en 1989 à l'Université d'Illinois à Urbana-Champaign. Dès sa fondation, l'Institut a voulu favoriser la recherche multidisciplinaire. Il couvre trois grands domaines de recherche : l'intelligence biologique, les interactions intelligentes homme-ordinateur et les nanostructures moléculaires et électroniques. Plus de 90 professeurs y poursuivent des recherches, dont 23 sur les nanostructures moléculaires et électroniques. Ces derniers sont rattachés aux départements de chimie, de physique, d'informatique et de génie. En 1999, l'Institut gérait 16,6 M \$ US en fonds de recherche, auxquels il faut ajouter les fonds des professeurs affiliés, d'une valeur de 15,4 M \$ US. La moitié des fonds de recherche de l'Institut, 8,6 M \$ US, provenaient du ministère de la Défense, 3,1 M \$ US du NIH et 3,7 M \$ US de la NSF. De plus, l'Institut est financé par l'État de l'Illinois, alors que la fondation Beckman accorde des bourses et fournit des fonds pour les achats d'équipement.

*Des recherches en
nanoélectronique*

Le groupe sur les nanostructures moléculaires et électroniques se consacre notamment aux processus chimiques et physiques des nanostructures moléculaires, aux systèmes mésoscopiques basés sur les semi-conducteurs ainsi qu'aux assemblages macromoléculaires. L'accent est mis en particulier sur la poursuite d'applications dans les domaines de l'électronique et de l'opto-électronique (p. ex. : des capacités de mémoire gigantesques) ainsi que dans le champ des nanostructures. Le groupe est plutôt bien pourvu en équipement, particulièrement en microscopes STM, AFM et NSOM, en équipement pour la lithographie en appareils pour l'étude des nanostructures, en chambres blanches. Au cours des années qui viennent, les chercheurs entendent s'intéresser de près à l'électronique moléculaire, de même qu'à l'utilisation de composants biologiques comme l'ADN, dans les domaines d'applications liés aux ordinateurs.

*Un centre majeur sur
les nanotechnologies
en Californie*

L'État de la Californie a annoncé récemment sa décision d'investir 300 M \$ US dans la création de trois nouveaux centres de recherche en biomédecine, en télécommunications et en nanotechnologies. Au cours des quatre prochaines années, l'État fournira 100 M \$ US à chacun d'eux, à charge pour ceux-ci de trouver 200 millions additionnels, notamment auprès des entreprises. Les universités de Californie à Los Angeles (UCLA) et de Californie à Santa Barbara (UCSB) se sont associées pour former le California NanoSystems Institute (CNSI) qui regroupera 81 professeurs des deux universités dans différents domaines. Trente-huit d'entre eux, surtout en informatique, travailleront en analyse et imagerie ainsi qu'en simulation, en modélisation et en analyse de données. Le CNSI vise, par une approche multidisciplinaire, à créer les nouvelles technologies biomédicales et de l'information du 21^e siècle, avec des applications si possible à court terme. Il occupera 30 000 mètres carrés répartis dans deux édifices sur les deux campus. Le centre aura une direction commune et un programme unique de formation et de recrutement des étudiants.

Programmes de recherche

Son programme de recherche couvre plus particulièrement les nanotechnologies de type ascendant (*bottom up*) et est très ambitieux, combinant la médecine moléculaire (protéomique et génomique), les mathématiques et l'informatique (modélisation, visualisation, etc.) et la nano-ingénierie (nanoélectronique, nanofabrication, nanosenseurs, etc.).

Le CNSI entend favoriser le plus d'interactions possible avec les chercheurs des entreprises, des laboratoires gouvernementaux ainsi que d'autres chercheurs d'universités américaines ou étrangères. Il compte également offrir des cours d'immersion spécialisés pour former des étudiants, des chercheurs industriels et des dirigeants d'entreprises aux nouvelles avenues de recherche.

Une taille minimale importante

L'examen de ces quatre centres montre que des investissements importants sont consentis pour doter les chercheurs de l'équipement nécessaire à la recherche de pointe. Il semble qu'aux États-Unis la taille minimale d'un centre demande un investissement de 60 M \$ US. De plus, le nombre de chercheurs qui y consacrent l'essentiel de leur temps de recherche varie entre 30 et 80. Enfin, plusieurs de ces centres combinent les nanotechnologies et les microtechnologies, les deux ayant recours à plusieurs appareils communs, en particulier en lithographie.

Les entreprises actives en nanotechnologies aux États-Unis**Implication des entreprises : surtout le fait des firmes en électronique**

Plusieurs grandes entreprises américaines sont actives en nanotechnologies. Cependant, hormis les compagnies Dow, DuPont et Eastman Kodak, il s'agit essentiellement d'entreprises en électronique, plus particulièrement en fabrication de semi-conducteurs. Le cas d'IBM est assez connu, cette entreprise ayant au moins deux laboratoires à Zurich et à Almaden en Californie qui poursuivent des recherches dans le secteur. Il semble également qu'Hewlett Packard y consacre plus de 50 % de sa recherche de long terme. Pour ce qui est des petites ou moyennes entreprises, on peut avancer qu'une centaine d'entre elles s'intéressent totalement ou partiellement aux nanotechnologies aux États-Unis. Elles peuvent être regroupées en deux grands secteurs, celui des matériaux et celui des biotechnologies, sans compter les compagnies fabriquant des instruments destinés à la recherche.

Nombre limité d'entreprises

Une quarantaine d'entreprises américaines seraient actuellement présentes dans les nanomatériaux alors qu'une cinquantaine se spécialiseraient dans les domaines liés surtout aux microtechnologies mais faisant appel à des nanotechnologies, par exemple des biosenseurs.

En résumé, le nombre d'entreprises intervenant uniquement en nanotechnologies aux États-Unis ne dépasse sans doute pas la cinquantaine en ce moment, mais il faut se rappeler que la situation évolue rapidement. Les nanomatériaux sont encore un secteur en émergence, et la création d'entreprises découle par exemple de *spin-offs* des centres et laboratoires de recherche.

2.2 La recherche en Europe²¹

D'après une enquête effectuée en 1997 par une équipe de chercheurs américains, sous les auspices de la NSF, les gouvernements d'Europe et du Japon consacraient en 1997 les mêmes montants que le gouvernement américain à la recherche en nanotechnologies. Le tableau 6 en témoigne. Or, comme le pib du Japon correspondait à 50 % de celui des États-Unis, le gouvernement japonais consentait en fait à un effort financier relatif deux fois plus grand. L'effort de l'Europe de l'Ouest était légèrement supérieur à celui des États-Unis.

Tableau 6
Dépenses gouvernementales en recherche sur les nanotechnologies, 1997

Région	Montants (millions de \$ US)	ppm ¹
Japon	120	27
États-Unis	116	15
Europe de l'Ouest	128	18
Autres pays (Chine, Russie, Canada, Australie, Corée, Taiwan, Singapour)	70	nd
Total	432	nd

1- ppm : partie par million de dollars de pib.

Source : *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*, op. cit.

Les données du tableau 6 ne couvrent que l'année 1997 et la situation s'est modifiée depuis. Le gouvernement américain a haussé son niveau d'aide financière à 422 M \$ US en 2001. En Europe, le 6^e Programme cadre consacra 36 M \$ de plus que le précédent à la recherche en matière de nanotechnologies. Quant au Japon, le gouvernement y annonçait, au printemps de 2001, sa volonté de porter ses dépenses à cet égard à 350 M \$ US par année.

Le tableau 7 permet de vérifier que la qualité des recherches menées tant en Europe qu'au Japon se compare avantageusement à celle observée aux États-Unis.

Tableau 7
Comparaison des activités en sciences et technologie des nanostructures en Europe, au Japon et aux États-Unis.

Domaine	Niveau d'excellence		
	1 ¹	2	3
Synthèse et assemblage	É.U.	Europe	Japon
Approches et applications biologiques	É.U./Europe	Japon	
Dispersions et revêtements	É.U./Europe	Japon	
Matériaux à surfaces élevées	É.U.	Europe	Japon
Nanoappareils	Japon	Europe	É.U.
Matériaux consolidés	Japon	É.U./Europe	

1. Le plus élevé.

Source : *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*, op. cit.

21. La majorité des informations des sections sur l'Europe et le Japon proviennent de l'étude internationale effectuée par un groupe spécialement mis sur pied à cette fin par la NSF soit le WTEC qui a produit le rapport *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*, op. cit.

Plusieurs programmes de la CEE subventionnent les recherches en nanotechnologies

Un examen de l'ensemble des programmes de l'Union Européenne (UE) ainsi que des divers pays membres permet de tirer un certain nombre de leçons. Plusieurs programmes de l'UE sont axés sur le développement des nanotechnologies. C'est ainsi que le 5^e Programme cadre de recherche qui s'étendait de 1998 à 2002 leur a consacré 200 millions d'euros (environ 290 M \$) alors que le 6^e Programme 2002-2006 leur réserve 225 millions d'euros (environ 325 M \$). Ce dernier a ciblé sept domaines de recherche prioritaires et les nanotechnologies en font partie. Le 5^e Programme cadre avait financé 15 projets en nanobiotechnologie, 15 en nanoélectronique et 20 en nanomatériaux. Les programmes de l'UE cherchent tous à stimuler les interactions entre les centres de recherche gouvernementaux et universitaires des pays membres. Par exemple, le programme Phantoms créé en 1992 est un réseau de 40 centres qui vise à stimuler la nanoélectronique, la nanofabrication, l'optoélectronique et le routage électronique (electronics switching). Le coordonnateur du programme est l'International Micro-electronic Center (IMEC), un important centre de microélectronique situé à Louvain, en Belgique. Les programmes Esprit et Brite-Euram étaient également en partie voués aux nanotechnologies. Mentionnons de plus, en guise d'exemples, l'European Consortium on NanoMaterials formé en 1996 et regroupant des universités et quelques entreprises de différents pays, de même que le Network for Excellence on Organic Materials for Electronics qui consacre une partie de ses fonds à la nanotechnologie depuis 1992. En fait, il existe plusieurs autres regroupements de centres publics et universitaires en Europe, qui travaillent au développement des nanotechnologies.

Les nanotechnologies : une priorité pour la CEE

Convaincue que les nanotechnologies seront à l'origine de la prochaine révolution industrielle, l'UE cherchera à intensifier les collaborations sur ce sujet, encore peu poussées, entre centres de recherche universitaires européens et centres américains. La NSF américaine, en effet, encouragerait les collaborations bilatérales, au détriment de celles multilatérales. Cette situation pourrait toutefois changer à la suite des discussions tenues lors du séminaire UE-EU sur les nanotechnologies, à Toulouse en octobre 2000.

Les nanotechnologies en Allemagne

Les nanotechnologies fortement appuyées par le gouvernement allemand

En Allemagne, le ministère fédéral de l'Éducation, de la Science, de la Recherche et de la Technologie (BMBF) consacrait des montants substantiels aux nanotechnologies, dont 75 M \$ en 1997. En 1998, le BMBF annonçait la création de cinq nouveaux centres d'excellence en nanotechnologies. Ces centres ont commencé leurs opérations en 1998 et leurs domaines de recherche portent sur les couches ultraminces, les applications de nanostructures en optoélectronique, la construction et l'application de nanostructures latérales, les nanotechnologies et la chimie, la fabrication de surfaces ultraprécises et, enfin, la nanoanalyse (*nanoanalytics*).

Un institut des matériaux très impliqué dans les nanotechnologies

À ces nouveaux centres, il faut en ajouter de plus anciens. L'Institut of Solid State and Materials Research à Dresde fut créé en 1992. Environ 400 personnes y œuvrent, dont 235 permanents; la recherche y est autant théorique qu'appliquée. Son budget était de 37 M \$ en 1996. Le tiers des groupes de recherche de l'institut sont impliqués à plein temps ou à temps

partiel dans des recherches sur les nanotechnologies. Ses laboratoires sont très bien équipés et à la fine pointe de la technologie.

Développer les matériaux de l'avenir

Mentionnons également l'Institut des nouveaux matériaux à Saarbrücken, créé en 1988 et situé sur le campus de l'université de Saarland. L'Institut regroupe 280 scientifiques et techniciens et a pour mandat de développer de nouveaux matériaux à vocation industrielle. Les projets intégrant les nanotechnologies y prennent une importance croissante. L'Institut est très bien pourvu en équipement (microscopes AFM, NMR, etc.).

Les nanotechnologies au service de l'énergie

Enfin, l'Institut Max Planck pour la recherche sur le charbon, fondé en 1912, emploie 220 personnes permanentes et accueille une centaine d'étudiants diplômés, et post-doctoraux ainsi que de chercheurs invités. Ses principaux domaines de recherche portent sur la création de nouveaux matériaux en vue d'applications dans la catalyse, l'entreposage et la production d'énergie. Les recherches centrées sur les nanotechnologies portent plus particulièrement sur des catalyseurs hautement sélectifs ainsi que sur la production de matériaux oxydés inorganiques microporeux et à surface élevée en vue de l'entreposage d'énergie. Par exemple, les hydrures métalliques sont étudiés dans l'entreposage de l'hydrogène. L'Institut dispose d'un équipement de classe mondiale.

Si la recherche sur les matériaux est très intense, celle sur les nanobiotechnologies semble plutôt absente en Allemagne. En fait, la réputation des centres allemands se situe clairement dans le secteur des matériaux.

Les nanotechnologies en France

Le CNRS : fer de lance de la recherche en nanotechnologies

Ce sont avant tout le Conseil national de la recherche scientifique (CNRS) et les universités qui sont le fer de lance de la recherche sur les nanotechnologies en France, les entreprises y étant peu présentes. Quelques grandes entreprises comme Thomson, Saint Gobain, Rhône Poulenc et Air Liquide, financent une partie des recherches poursuivies dans les laboratoires du CNRS. Ce dernier compte environ 500 chercheurs, tant des physiciens que des chimistes, répartis dans 60 laboratoires et impliqués à divers titres en nanotechnologies. Les domaines de recherche sont extrêmement diversifiés et touchent à l'ensemble des nanomatériaux et de la nano-électronique, y compris l'électronique moléculaire, le nanomagnétisme, les nanotubes de carbone, les semi-conducteurs à bande large, les catalyseurs, les nanofiltres, les zéolites, les matériaux hybrides, les couches d'oxyde, l'autoassemblage et l'agrochimie.

Plusieurs laboratoires du CNRS impliqués

Ainsi, au moins 25 des laboratoires mènent des recherches sur les membranes et sur les systèmes colloïdaux mixtes ainsi que sur la nanochimie, alors que 10 laboratoires étudient l'utilisation de poudres céramiques formées de nanoparticules pour les matériaux composites et hybrides. Dans le domaine des nanotubes de carbone et des fullerènes, des recherches impliquant des laboratoires français, allemands et irlandais sont poursuivies. On mène également des recherches intensives sur les matériaux, par exemple pour renforcer les plastiques, le caoutchouc ou le béton au moyen de nanoparticules et pour en augmenter la dureté, la résistance et la ductilité.

En nanobiotechnologie, c'est avant tout l'Institut Curie à Paris qui détient l'expertise. Ses recherches portent notamment sur des nanostructures molles autoassemblées, sur des particules pour la délivrance des médicaments ou pour la thérapie génique, etc.

Les nanotechnologies au Royaume-Uni

Implication avec des entreprises japonaises

Les universités sont les principaux acteurs en matière de nanotechnologie au Royaume-Uni, notamment celles d'Oxford et Cambridge. À Cambridge, trois centres poursuivent des recherches, dont deux sont entièrement financés par Toshiba et Hitachi. Le Toshiba Research Center poursuit des travaux en recherche fondamentale et entretient des liens très étroits avec un centre de recherche de Toshiba au Japon. Hitachi a pour sa part établi à Cambridge le Microelectronics Research Center. Ce centre collabore étroitement avec le laboratoire de physique de cette université. Les laboratoires sont fort bien pourvus en équipement de toutes sortes.

L'université d'Oxford est elle aussi très active en nanotechnologies, principalement dans son département des matériaux qui regroupe des physiciens, des chimistes et des ingénieurs.

Les nanotechnologies en Suède

Forte implication de la Suède en nanotechnologies

Quatre importants consortiums existent en recherche sur les nanotechnologies en Suède, soit celui sur les particules ultrafines et les groupements d'atomes, celui sur les structures nanométriques, celui sur les matériaux nanométriques et le laboratoire Ångström.

Plusieurs sources de financement

Plusieurs organismes financent la recherche, dont le National Board for Industrial and Technological Development (NUTEK), le Natural Sciences Research Council (NFR) et la Swedish Foundation for Strategic Research (SSF). En 1998, le NFR a alloué plus de 6 % de ses fonds aux recherches sur le secteur, soit près de 5 M \$. Le NFR finance également des chaires de recherche sur les nanotechnologies dans les universités. La SSF est de création récente puisqu'elle remonte à 1994. Elle est dotée d'un budget de près de 1,2 MM \$. En 1998, la SSF a financé à hauteur de 8 M \$ divers projets portant sur les matériaux et les nanotechnologies. Les domaines de recherche touchent autant les nanomatériaux que la nanoélectronique et les nanobiotechnologies. De plus, la SSF a consacré 2 M \$ à des recherches sur l'électronique à haute vitesse, la photonique et la nanoélectronique. On estime qu'en 1998, les dépenses publiques consacrées au secteur se chiffraient à environ 15 M \$.

En fait, les recherches en Suède sont extrêmement diversifiées et couvrent l'ensemble des différents domaines de recherche vus au premier chapitre.

Les nanotechnologies en Suisse

Plusieurs acteurs présents

Les acteurs présents en nanotechnologies sont nombreux en Suisse. La majorité des universités et centres de recherche actifs dans ce domaine se sont récemment regroupés pour former le NCCR Nanoscale Science. Sa tête de pont est située à l'Institut de physique de l'université de Bâle, auquel s'ajoutent l'École polytechnique fédérale de Lausanne, l'Institut Paul Scherrer,

l'Institut fédéral suisse de technologie de Zurich, le laboratoire d'IBM à Zurich, l'Institut de microtechnologie de l'université de Neuchâtel, le Swiss Center for Electronics and Microtechnology, une entreprise privée ainsi que l'université de Zurich.

Parmi les champs de recherche explorés en Suisse, ceux portant sur l'instrumentation ressortent de l'ensemble.

*Le laboratoire d'IBM
à Zurich*

Le laboratoire d'IBM à Zurich assume un rôle majeur en Suisse. C'est un laboratoire important, qui emploie 300 personnes de différentes disciplines (ingénieurs, chimistes, physiciens, mathématiciens et informaticiens) travaillant le plus souvent en partenariat entre eux et avec les universités. Soulignons que trois de ses chercheurs ont obtenu un prix Nobel de physique au cours des vingt dernières années. En moyenne, une trentaine de chercheurs extérieurs y poursuivent leurs travaux et, en 2000, 80 projets ont été réalisés conjointement avec des universités européennes.

Les nanotechnologies aux Pays-Bas

Aux Pays-Bas, l'Institut de technologie de la microélectronique (DIMES) et la compagnie Philips sont les deux acteurs clés en nanotechnologies.

*DIMES : un centre
d'excellence en
microélectronique*

Le DIMES²² est un centre important, qui a été créé en 1987 grâce au financement du gouvernement et qui est rattaché à l'université de Delft. Il détient une excellente réputation à l'échelle internationale, et pour cause. Il dispose de 2 000 m² de chambres blanches; 300 personnes y travaillent, dont une centaine d'étudiants au doctorat. Une vingtaine d'étudiants y obtiennent leur doctorat chaque année. De plus, la plupart des projets de recherche effectués le sont en collaboration avec les entreprises. Le budget total en 1999 fut de 22 M \$, dont 3,6 M \$ en contrats de recherche externes.

*Domaines de
recherche*

Le DIMES vise essentiellement à être un centre d'excellence en microélectronique, autour de quatre thèmes : les technologies pour les communications à haute vitesse, les microsystèmes intégrés intelligents, l'électronique à l'échelle nanométrique et l'électronique à grande échelle. Ces domaines de recherche touchent plusieurs secteurs, dont la nanotechnologie, l'optique des particules, la physique des semiconducteurs, la science des matériaux, les systèmes et circuits électroniques, les circuits photoniques intégrés, les senseurs intégrés, les composants électroniques et les matériaux liés aux appareils de communication et de traitement de l'information. Il dispose d'un équipement très sophistiqué, dont des appareils de lithographie par faisceau d'électrons et des microscopes FEM pour l'étude de structures nanométriques photoniques. De plus, les MEMS font l'objet d'une attention particulière.

Les nanotechnologies dans les autres pays d'Europe

Au cours des dernières années, pratiquement tous les autres pays de l'Union Européenne ont institué des programmes sur les nanotechnologies. Par exemple en 1997, la Finlande a lancé un projet triennal qui leur est

22. Voir le site web de l'Institut <http://www.dimes.tudelft.nl>

réservé. Seize projets de recherche ont été retenus de 1997 à 1999, bénéficiant d'un financement total de près de 14 M \$. Depuis 1993, la Belgique et l'Espagne ont elles aussi mis en œuvre divers programmes portant sur les nanotechnologies et ont créé des centres d'excellence à cette fin. Les interactions universités-entreprises sont notamment privilégiées.

2.3 La recherche au Japon

Forte progression des dépenses de R-D dans les laboratoires publics et les universités japonaises

Au cours des vingt dernières, le Japon a consacré un pourcentage important de son pib à la R-D. Jusqu'au milieu des années 1990, cette situation était surtout attribuable aux entreprises japonaises, le pourcentage du pib alloué à la recherche dans les universités japonaises étant inférieur à celui qu'on observait dans les grands pays industrialisés. La Loi sur la science et la technologie, promulguée par la Diète japonaise en novembre 1995, devrait changer cette situation car elle a obligé le gouvernement japonais à mettre en place deux plans successifs d'investissement en science et technologie. Par le premier plan, qui couvrait la période 1996 à 2001, le gouvernement s'engageait à investir 225 MM \$ supplémentaires en recherche. Cet objectif a été légèrement dépassé. Le Conseil de la science et de la technologie du Japon et le ministère des Finances sont en train de négocier le deuxième plan qui s'étendra de 2002 à 2006. Le ministère de l'Éducation, de la Science et de la Technologie (Monbu Kagakusho), qui est né de la fusion des ministères de l'Éducation (Monbusho) et de la Science et de la Technologie, fournira 75 % de l'enveloppe, alors que les 25 % restants proviendront d'autres ministères, dont le plus important est le METI (ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, en fait l'ancien MITI) et son réseau important de laboratoires de l'AIST (Agency of Industrial Science and Technology).

Les nanotechnologies : une priorité au Japon

Non seulement le gouvernement mais aussi les entreprises japonaises veulent intensifier leurs efforts en nanotechnologies. En effet, stimulé par l'initiative du gouvernement américain, le Japon est en voie d'établir la sienne, avec le soutien de la Fédération japonaise des organisations économiques, la Kaidanren, qui réunit les entreprises les plus influentes du Japon. Au printemps de 2001, le gouvernement japonais annonçait qu'il portera à 350 M \$ US son soutien financier aux recherches sur les nanotechnologies.

Une infrastructure de recherche de qualité et abondante

L'équipe du World Technology Evaluation Centre (WTEC), qui a visité la plupart des principaux centres de recherche japonais au cours de l'année 1997, a été impressionnée par la qualité et par la diversité des recherches et des infrastructures en nanotechnologies et en microélectronique, tant dans les laboratoires gouvernementaux qu'universitaires. Les groupes qui semblaient détenir une avance mondiale avaient choisi de se spécialiser dans des domaines précis plutôt que de couvrir l'ensemble d'un secteur. L'équipe a également souligné les liens étroits entre entreprises et universités, de même que le nombre élevé d'étudiants étrangers au doctorat ainsi qu'aux études post-doctorales, encouragés par des programmes spécifiques du gouvernement japonais.

*Excellence du Japon
en nanotechnologies*

Étant donné le nombre élevé d'acteurs tant dans les centres de recherche universitaires que dans les laboratoires gouvernementaux, les domaines de recherche sur les nanotechnologies sont très nombreux au Japon. C'est cependant dans le secteur de la nanoélectronique que le Japon est le plus performant. Par exemple, le Laboratoire électrotechnique du MITI regroupe 530 chercheurs et dispose d'un budget annuel de 150 M \$; il consacre entre 15 et 20 % de son budget à des recherches en nanoélectronique. Ce laboratoire vise à être parmi les premiers à développer la prochaine génération d'ordinateurs.

*Les recherches sur les
matériaux très actives*

Des recherches sur les matériaux sont également menées dans plusieurs centres universitaires et laboratoires gouvernementaux, par exemple sur les nanotubes de carbone et les fullerènes. Le Japon détient une avance certaine dans le domaine des métallofullerènes (des atomes de métal sont alors insérés dans des fullerènes). Plusieurs recherches différentes sont effectuées sur les nanoparticules, plus particulièrement sur les nanoparticules céramiques et métalliques. On cherche ainsi à obtenir des matériaux plus résistants, plus ductiles, meilleurs conducteurs d'électricité, résistant mieux au stress, etc. Les projets de recherche visent parfois des applications très pratiques; pensons aux matériaux nanoporeux pour absorber l'huile, ou encore aux matériaux à base de céramiques et de polymères dotés de propriétés semblables au Teflon, aux nouveaux alliages d'aluminium et d'autres métaux particulièrement résistants, aux matériaux capables d'entreposer l'énergie ou l'hydrogène, aux matériaux pour les piles à combustibles, etc.

*Grandes entreprises
japonaises
actives en
nanotechnologies*

Quelques grandes entreprises japonaises sont particulièrement actives en nanotechnologies; ce sont Hitachi, NEC, NTT, Fujitsu, Sony et Fuji Photo Film. Dans les laboratoires d'Hitachi, les recherches en nanotechnologies accaparent 25 % du budget alloué aux recherches fondamentales de long terme. On pense qu'environ 420 M \$ y sont consacrés annuellement et que les recherches liées à la nanoélectronique y sont intensives. La compagnie NEC consacrerait près de 25 M \$ à différents projets de recherche du type précompétitif, dont certains bénéficient d'un financement gouvernemental. Les recherches portent essentiellement sur la nanoélectronique. Quant à Toshiba, elle consacre 30 M \$ annuellement à des recherches sur les nanotechnologies. Dans le secteur des semi-conducteurs, plusieurs consortiums, regroupant surtout des entreprises mais également des universités, réalisent une partie de leur travaux en nanoélectronique.

Au cours des prochaines années, la recherche en nanotechnologies au Japon va s'intensifier, tant dans les universités que dans les laboratoires gouvernementaux et les entreprises.

Les recherches en nanotechnologies dans les autres pays asiatiques

Chine

La Chine est bien présente en matière de nanotechnologies. En effet, de 1988 à 1996, elle a été responsable de 5,6 % des publications mondiales en ce domaine. En 1996, environ 3 000 chercheurs y travaillaient. L'Académie chinoise des sciences apporte son soutien à des équipes de recherche, alors que la China National Science Foundation finance plutôt des chercheurs individuels.

*Taiwan, Corée du Sud,
Singapour, Australie*

À Taiwan, les recherches, qui portent principalement sur la miniaturisation des circuits électroniques, sont réalisées dans les universités et dans un consortium de recherche industriel. En Corée du Sud, un programme dédié aux nanotechnologies a été mis en œuvre en 1995. Les chercheurs s'intéressent à la nanoélectronique : semi-conducteurs à l'échelle nanométrique, Resonant Tunneling Devices (RTD), etc., fils quantiques, points quantiques autoassemblés, modulateurs, etc. Singapour a également établi un programme national sur les nanotechnologies en 1995. L'Australie poursuit aussi de son côté plusieurs projets. Les recherches y sont assez diversifiées; elles vont de la synthèse de nanoparticules pour la fabrication de membranes et de catalyseurs à la nanoélectronique, en passant par l'emploi de nanoparticules dans la transformation des minéraux. C'est le Conseil national de la recherche australien qui est le principal bailleur de fonds du pays.

2.4 Les constats généraux

De nombreux constats se dégagent de cette revue des différents pays.

- Aux Etats-Unis, on note une augmentation extrêmement importante du financement gouvernemental des nanotechnologies, un secteur devenu hautement prioritaire pour le gouvernement américain.
- Le financement de la recherche aux États-Unis provient de sources gouvernementales diversifiées, dont des organismes subventionnaires tels la NSF et le NIH certes, mais aussi des ministères, notamment celui de la Défense.
- La recherche menée dans les universités américaines semble avoir vraiment démarré grâce au réseau des Materials and Engineering Research Centers de la NSF. De plus depuis 1997, la NSF soutient quatre centres spécialisés en nanobiotechnologie.
- Plusieurs universités américaines disposent d'un financement abondant provenant, outre du gouvernement central, de fondations privées, de leurs propres fonds de dotation ou encore, parfois, des États eux-mêmes. Ces fonds permettent la construction de centres imposants et très bien équipés.
- Pratiquement tous les centres regroupent des physiciens, des chimistes, des biologistes, des mathématiciens et des informaticiens, et sont établis intentionnellement près des départements universitaires pour favoriser le maximum d'interactions entre professeurs-chercheurs et étudiants. On assiste à une convergence phénoménale entre les différentes sciences. Cette convergence est particulièrement frappante en biologie : les chercheurs tentent de plus en plus de combiner la matière vivante avec la matière inorganique, notamment grâce à des appareils électromécaniques microscopiques (MEMS).
- Les universités américaines manifestent une vive concurrence pour attirer les meilleurs étudiants et les meilleurs professeurs-chercheurs. La baisse du nombre d'étudiants en sciences et en génie au cours de la dernière décennie exacerbe le phénomène.

- De plus en plus, les grandes entreprises, surtout celles du secteur de l'électronique, soutiennent financièrement les centres universitaires spécialisés en nanotechnologies. De plus, les chercheurs industriels sont invités à effectuer des stages dans les centres universitaires, puisqu'il s'agit d'un secteur en émergence. Aux États-Unis, une cinquantaine de PME seraient actives en recherche. Encore peu rentables, concentrées surtout dans le secteur des matériaux, elles devraient prendre de l'expansion au cours des années qui viennent. Cette situation contraste avec celle qui a cours en Europe et au Japon, où les PME tournées vers les nanotechnologies sont pratiquement inexistantes, laissant toute la place aux grandes entreprises comme Hitachi, Philipps, etc.
- La simulation par ordinateur ainsi que la visualisation semblent prendre une importance grandissante dans les centres de recherche universitaires.
- Au cours des cinq à dix dernières années, presque tous les pays européens et asiatiques ont mis en place divers programmes de recherche spécifiques. En 1997, les pays européens dans leur ensemble ainsi que le Japon consentaient à un effort financier absolu aussi important que celui fourni par les États-Unis. Cependant, à la suite de la forte augmentation des fonds octroyés par le gouvernement américain en 2001, la situation s'est renversée et ce sont les États-Unis qui mènent la course. Le Japon est cependant en train de mettre en œuvre une stratégie pour combler son écart, de sorte que son effort relatif (par rapport au pib) sera sans doute supérieur à celui des États-Unis au cours des années à venir. Quant à l'Europe, les fonds qu'on consacrera aux recherches sur les nanotechnologies dans le 6^e Programme cadre connaîtront une augmentation modérée, de l'ordre de 13 %.
- Les universités et les laboratoires publics européens fonctionnent de plus en plus en réseau, grâce notamment aux programmes de l'UE. Il arrive régulièrement qu'entre 10 et 15 centres universitaires et publics soient engagés dans des projets de recherche communs. Cette situation contraste avec ce qui a cours aux États-Unis où les centres universitaires ont plutôt tendance à fonctionner en vase clos, mais en créant une grande synergie entre départements d'une même université.
- Les domaines de recherche sont très diversifiés, tant en Europe qu'au Japon. Cependant, les États-Unis jouissent d'une longueur d'avance en nanobiotechnologie. L'Europe excelle dans le secteur des matériaux, car les centres de recherche s'y inscrivent dans une longue tradition. Le Japon investit quant à lui des fonds importants en nanoélectronique et il semble que les recherches y soient à l'avant-garde. Malgré des investissements importants en nanoélectronique, l'Europe semble éprouver de la difficulté à prendre une avance dans ce domaine, peut-être à cause de l'absence de grandes entreprises dans ce secteur. En effet, c'est aux États-Unis et au Japon que se trouvent la plupart des grands joueurs, sur les semi-conducteurs notamment.

- Il est clair que les centres de recherche tant en Europe qu'au Japon disposent d'un équipement à la fine pointe. De plus, ces centres sont bien pourvus en ressources humaines (p. ex. : en techniciens spécialisés) pour soutenir les chercheurs.
- Au cours des dernières années, le Japon a mis en place plusieurs instruments pour augmenter la qualité des recherches, autant dans le domaine des nanotechnologies que dans l'ensemble des autres secteurs. Les chercheurs et les étudiants étrangers y sont les bienvenus. Les chercheurs universitaires, ceux des laboratoires publics et ceux des entreprises y sont fortement réseautés.
- Aussi bien en Europe qu'au Japon, il n'existe encore aucun centre de recherche voué exclusivement aux nanotechnologies. La plupart des recherches sont menées dans des centres spécialisés, soit dans les matériaux, soit en électronique, en raison de la nécessaire complémentarité entre les expertises requises et entre les besoins d'équipement. Ainsi, les chambres blanches peuvent servir à la fois pour la lithographie traditionnelle et pour la fabrication des MEMS, éventuellement des nanoMEMS. Même aux États-Unis, la création de centres voués exclusivement aux nanotechnologies demeure rare.

État de la recherche au Canada et au Québec

Nous avons découvert au chapitre précédent les efforts exponentiels auxquels ont consenti surtout les États-Unis et vraisemblablement le Japon, pour accélérer la recherche – encore de nature fondamentale – en nanotechnologies. Mais où se situent le Canada et le Québec dans ce qui semble devenir une course contre la montre? Le présent chapitre s'attarde à décrire quels y sont les principaux acteurs, en rapportant les informations disponibles, d'abord au sein des universités situées à l'extérieur du Québec, puis dans les laboratoires fédéraux et, enfin, dans les universités québécoises. Le chapitre se termine par les constats qui méritent d'en être tirés et qui paveront la voie aux recommandations du dernier chapitre.

3.1 La recherche dans les universités canadiennes

Un niveau de recherche faible au Canada

Une étude publiée en mai 1997²³ et réalisée pour le compte du Conseil national de la recherche du Canada passait en revue les publications scientifiques parues sur les nanotechnologies entre 1989 et 1996; on y concluait que le rythme de publication s'accroissait dans l'ensemble du monde, mais que les recherches menées au Canada étaient peu nombreuses, et ce, dans pratiquement tous les sous-champs de recherche concernés.

Manque de prestige des recherches effectuées en nanotechnologies au Canada

Un autre groupe de travail confirmait, également en 1997, le faible rayonnement de la recherche en nanotechnologies au Canada. Mis sur pied par la National Science Foundation (NSF) pour broser un portrait de la recherche dans le monde, ce groupe n'a pas jugé bon de s'arrêter sur la situation canadienne. Son rapport²⁴, qui totalise 335 pages, lui consacre tout juste six lignes. Certes, on mentionne que des recherches intéressantes se déroulent probablement dans les pays qui n'ont pas été inclus au rapport, mais on ajoute du même souffle que la priorité a été accordée aux endroits les plus productifs et les plus prometteurs.

Il est permis de douter que la situation se soit modifiée de manière substantielle depuis 1997. Un portrait des principaux acteurs au Canada et au Québec doit néanmoins être tracé.

La banque de données du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du CRSNG

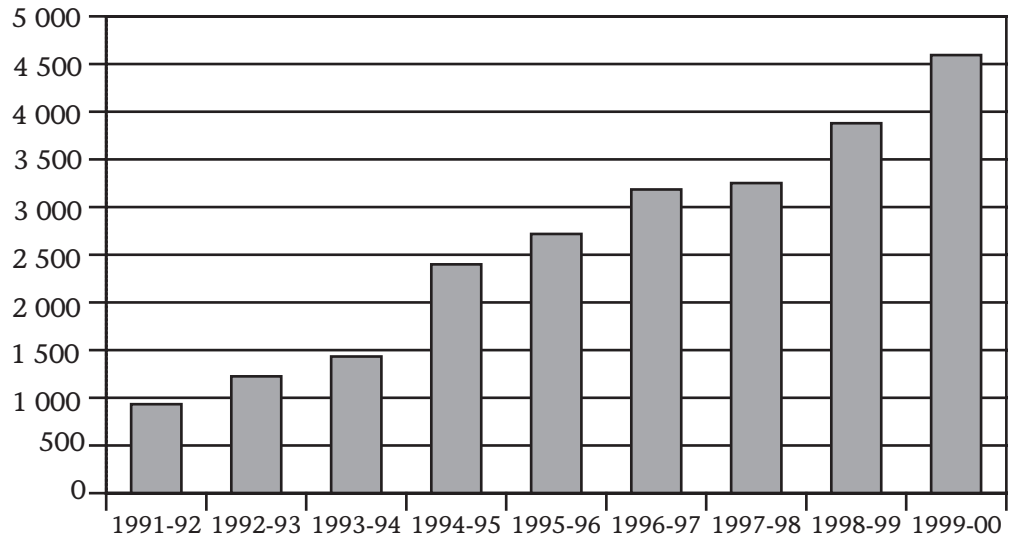
La banque de données du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG)²⁵ constitue une source fiable pour mesurer l'effort de recherche en milieu universitaire. De 1991-1992 à 1999-2000, l'organisme subventionnaire aura versé entre 1 M \$ et 4,6 M \$ par année, sous forme de subventions, bourses et acquisition d'appareillage. La croissance rapide des fonds consacrés aux nanotechnologies apparaît clairement au graphique 3.

23. Robert Dalpé, Éline Gauthier et Marie-Pierre Ippersiel, *The State of Nanotechnology Research*, Report to the National Research Council of Canada, May 1997.

24. *Nanostructure Science and Technology, A Worldwide Study*, op.cit.

25. Nous avons compilé les données à partir d'une liste de mots clés, liste tirée de la recherche effectuée par Dalpé et al. en 1997 pour le compte du CNRC, mais légèrement modifiée avec quelques ajouts.

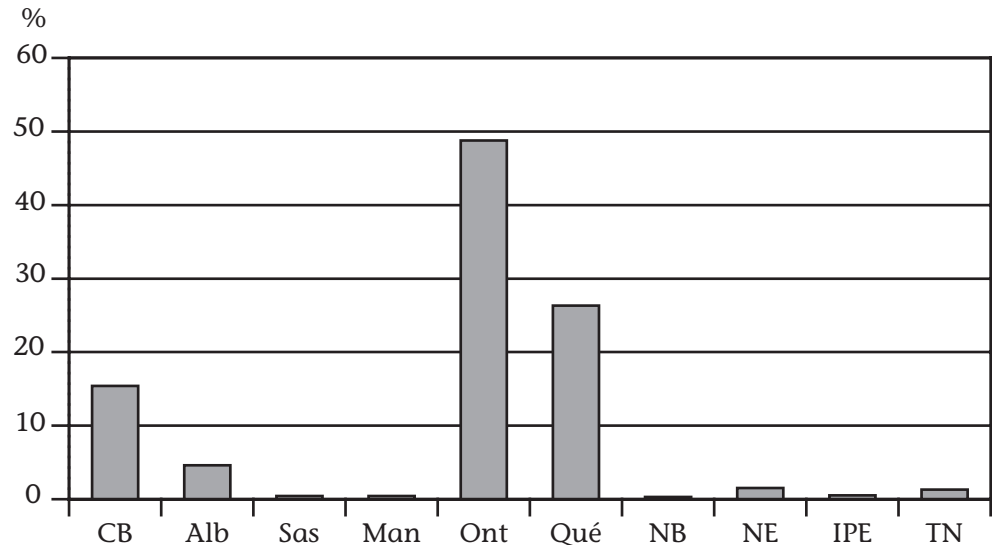
Graphique 3
Subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies, 1991-1992 à 1999-2000, (000 \$)



Source : Banque de données du CRSNG sur les subventions et bourses.

Comme l'illustre le graphique 4, ce sont les universités ontariennes qui ont été les plus actives, décrochant près de 49 % du total des subventions octroyées. Le Québec suit avec 26 %, puis la Colombie-Britannique, avec 15 %. Quant aux universités albertaines, elles obtiennent moins de 5 % des fonds, les recherches y ayant démarré en 1996 seulement.

Graphique 4
Pourcentage des subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies par province, 1991-1992 à 1999-2000.



Source : Banque de données du CRSNG sur les subventions et bourses.

Le tableau 8 rapporte la répartition des subventions entre les différents programmes du Conseil. Les subventions individuelles de recherche ont formé 58 % du total des fonds versés. Les subventions d'appareillage ont obtenu près de 12 %, alors que les projets de recherche menés en coopération ont représenté 24 % du total.

Tableau 8
Répartition des subventions et bourses accordées par le CRSNG,
sur les nanotechnologies 1991-1992 à 1999-2000

	Montant (000 \$)	%
Programme de subventions de recherches individuelles	13 776	58,3
Subventions d'appareillage	2 753	11,7
Recherches en collaboration (CNRC, recherche concertée, projets stratégiques de groupe, recherche coopérative)	5 554	23,5
Professeurs-chercheurs industriels et subventions de recherche à incidence industrielle	1 404	5,9
Autres	139	0,6
Total	23 626	100.0

Source : Banque de données du CRSNG sur les subventions et bourses.

*Universités
canadiennes les plus
actives en
nanotechnologies*

En ce qui a trait à la répartition de l'enveloppe entre les universités canadiennes, c'est indéniablement l'université de Toronto qui a été la plus active au cours de la même période, comme le démontre le tableau 9. À elle seule, elle a obtenu plus de 21 % des subventions accordées. L'Université de Colombie-Britannique arrive en second, avec près de 12 %, suivie de l'Université McGill et de l'Université de Waterloo chacune récoltant 7 % du total. L'Université de Montréal se classe 5^e, avec 6 %, surtout grâce à l'École polytechnique puisque celle-ci a obtenu 76 % des subventions remises à l'Université.

Le tableau 10 permet de comparer l'effort financier du gouvernement canadien à celui des autres pays. Il pose cependant deux hypothèses préalables : d'une part, la croissance des subventions du CRSNG se serait maintenue en 2000 et 2001, et d'autre part, le CNRC aurait consacré aux nanotechnologies, dans ses propres laboratoires, un montant égal à celui accordé par le CRSNG à l'ensemble des universités, soit 3 M \$ en 1997 et 6,6 M \$ en 2001.

Nous constatons dans un premier temps qu'en 1997 le Canada consacre 7 ppm (parties par million) de son pib au secteur des nanotechnologies, contre 15 ppm pour les États-Unis et 27 ppm pour le Japon. Son effort relatif s'est accru par la suite, puisqu'il réserverait possiblement 13 ppm de son pib au secteur en 2001. Mais les États-Unis progressent plus rapidement, avec 41 ppm la même année.

*Un énorme
rattrapage à faire au
Canada*

Il est possible d'en déduire l'investissement auquel le Canada devrait consentir pour rejoindre, en termes relatifs, celui des autres pays. Si nos hypothèses tiennent la route, le financement gouvernemental au Canada devrait atteindre, en 2001, 40 M \$ US pour équivaloir à celui des États-Unis, 29 M \$ pour correspondre à celui du Japon en 1997 et 20 M \$ pour égaler celui de l'Europe en 1997. Le Canada apparaît donc encore loin de ces cibles, avec un montant estimé de seulement 13 M \$ en 2001. Il faudrait ajouter que le président Bush se propose de consacrer 492 M \$ US aux recherches sur les

nanotechnologies en 2002. Pour sa part, le Japon avait, au printemps 2001, l'intention de porter à 350 M \$ US son financement annuel au cours des années à venir, soit le triple de ce qu'il y consacrait en 1997.

Tableau 9
Subventions totales accordées aux universités canadiennes par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies de 1991-1992 à 1999-2000.

Universités	(000 \$)
Université de Toronto	5 017
Université de Colombie-Britannique	2 752
Université McGill	1 617
Université de Waterloo	1 599
Université de Montréal (inclut l'École polytechnique)	1 397
Université Queen's	1 243
Université d'Alberta	867
Université Laval	781
Université McMaster	778
Université Simon Fraser	716
Institut national de la recherche scientifique	716
Université Western Ontario	672
Université York	590
Université du Québec à Montréal	562
Université de Guelph	524
Université du Québec à Trois-Rivières	502
Université de Windsor	447
Université Concordia	357
Université de Sherbrooke	323
Université Memorial	307
Université d'Ottawa	265
Université de Calgary	237
Université Dalhousie	200
Université de Victoria	198
Université Laurentienne	187
Université Brock	131
Université de l'Île-du-Prince-Édouard	110
Université du Manitoba	102
Université Saint Mary's	100
Autres universités	329
Total	23 626

Source : Banque de données du CRSNG sur les subventions et bourses.

Tableau 10
Financement gouvernemental des recherches sur les nanotechnologies

Pays	1997 M \$ US	ppm ¹ M \$ US	2001	ppm
États-Unis	116	15	422	41
Japon	120	27	nd	nd
Europe	128	18	nd	nd
Canada ²	6	7	13 ³	13

1. ppm : partie par million de dollar de pib

2. en dollars canadiens

3. Estimé avec une hypothèse de croissance de 20 % par année des subventions du CRSNG en 2000 et 2001 (soit les taux de croissance observés en 1998 et 1999) ce qui porte à 6,6 millions les subventions du CRSNG en 2001, et hypothèse supplémentaire d'un effort équivalent du CNRC dans ses laboratoires.

Cette comparaison fait en plus abstraction du retard qu'accuse déjà le Canada sur le plan de l'équipement. Il faudra donc que celui-ci consacre bien plus que 41 ppm de son pib, et donc plus que 60 M \$, pour rejoindre les pays en tête de peloton.

Les paragraphes qui suivent présentent un bref survol des activités menées au sein des sept universités canadiennes les plus actives en nanotechnologies à l'extérieur du Québec.

L'Université de Toronto

Une dizaine de professeurs impliqués

À l'Université de Toronto, les recherches en nanotechnologies ont été effectuées à l'Energus Centre for Advanced Nanotechnology (ECAN) du département de métallurgie et des sciences des matériaux, de même que par différentes équipes des départements de chimie ainsi que de génie informatique et électrique. Plus d'une dizaine de professeurs, entourés de professeurs invités, de professionnels de recherche, de même que plus d'une cinquantaine d'étudiants diplômés et de chercheurs post-doctoraux ont participé à cet effort de recherche au cours des années 1990.

Collaborations avec des universités américaines

L'ECAN s'est entendu avec le CNRC, le Cornell Nanofabrication Centre et l'Université de Caroline du Nord afin de mener des recherches sur la modélisation de l'autoassemblage de points quantiques, sur les propriétés optiques et de transport des structures quantiques de faible dimension, sur les bandes d'énergie interdite en nanophotonique, sur la nanofabrication et la nanocaractérisation de structures quantiques de faible dimension, et, enfin, sur la nanolithographie.

Des professeurs du département de chimie ont travaillé à des stratégies qui permettent de générer des nanoparticules, de les voir et d'en étudier les propriétés optiques, électriques et chimiques. Les nanostructures organométalliques ont retenu leur attention en raison de leur éventuelle utilisation en nanolithographie et en nanoélectronique comme fils de dimension nanométrique semi-conducteurs. Des recherches ont aussi été menées dans le domaine de la synthèse non aqueuse de cristaux géants de zéolite. Dans le domaine de la nanophotonique, des professeurs du département de génie informatique et électrique se sont intéressés à la fabrication de nanostructures à l'aide du laser. Des travaux théoriques et des expériences ont été entrepris sur l'intégration de nanocristaux semi-conducteurs à des polymères émetteurs de lumière, dans le but de développer éventuellement des réseaux d'ordinateurs ultrarapides. Enfin, des recherches ont été faites sur les propriétés, sur les caractéristiques, ainsi que sur la synthèse électrochimique des matériaux nanocristallins.

L'Université de Colombie-Britannique

Centre AMPEL

Des recherches sur les nanotechnologies ont été réalisées à l'Université de Colombie-Britannique, par l'Advanced Materials and Process Engineering Laboratory (AMPEL) ainsi que par les départements de physique, de chimie et de génie métallurgique et des matériaux. Une dizaine de professeurs, entourés d'une vingtaine d'étudiants diplômés et de chercheurs post-doctoraux, ont fait partie des équipes de recherche au cours des années 1990.

*Des recherches en
nanophotonique*

Au sein d'AMPEL, les chercheurs du Photonics and Nanostructures Lab se sont intéressés au comportement des électrons, des phonons et des photons dans des nanostructures artificielles (puits quantiques), dans le but de concevoir de nouveaux matériaux optiques. Les chercheurs du Interfacial Analysis Research Laboratory ont développé la microscopie STM et celle à rayons X afin d'étudier les nanostructures semi-conductrices. Les chercheurs du Molecular Beam Epitaxy Lab, au département de génie électrique et informatique, se sont penchés sur l'utilisation de la microscopie SPM pour la caractérisation structurale et la nanolithographie, ainsi que sur la croissance et le monitoring en temps réel de couches minces semi-conductrices servant en optoélectronique.

*Des recherches
diversifiées*

Au département de physique et d'astronomie, des recherches ont été menées, en collaboration avec l'université de Californie à Santa Cruz, en vue de mettre au point un appareil pour détecter et compter les molécules d'ADN à l'aide de nanopores. Au département de chimie, des recherches en chimie des matériaux ont porté sur de nouvelles façons de créer des molécules (notamment des dendrimères) de dimensions nanométriques (1-5 nm) qui pouvaient être intégrées dans des matériaux, de même que servir en photonique ou à la création d'appareils moléculaires. D'autres travaux ont été poursuivis sur la caractérisation des polymères, des catalyseurs, des gels, des surfaces, des zéolites et des solides organiques et organométalliques à l'aide des techniques de haute résolution de résonance magnétique nucléaire, sur le développement d'appareils électroniques à base de molécules, tels des senseurs, des diodes, et des transistors, ainsi que sur de nouveaux matériaux à base de nanoparticules destinés à des appareils électroluminescents. Enfin, au département de génie métallurgique et des matériaux, les chercheurs du groupe des matériaux composites ont travaillé à la caractérisation de nanoparticules de céramique utilisées pour du matériel de protection.

L'Université de Waterloo

L'Université de Waterloo s'est associée à l'Université Guelph pour former le Guelph-Waterloo Physics Institute et le Guelph-Waterloo Centre for Graduate Work in Chemistry and Biochemistry, deux centres qui ont mené des recherches en nanotechnologie, en biophysique, en physique des matériaux et de la matière condensée, en chimie et en chimie physique. Une dizaine de professeurs des deux universités, accompagnés d'une vingtaine d'étudiants diplômés et de chercheurs post-doctoraux, ont participé aux travaux durant les années 1990.

*Recherches sur
les composés
de carbone,
les dendrimères,
les zéolites*

Les études ont porté sur les composites de nanocarbone, les propriétés électroniques et la caractérisation des surfaces par microscopie STM et par spectroscopie ST, les propriétés dynamiques des dendrimères et leur utilisation dans la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, l'utilisation des zéolites comme senseurs chimiques, la formation à l'échelle nanométrique de polymères conducteurs et d'interfaces semi-conductrices pour des applications en électronique moléculaire, la formation de nanostructures par gravure dans du silicone poreux et par dépôt (puits et points quantiques), de même que le comportement des fluides à l'intérieur de nanopores dans des membranes ou entre deux surfaces.

L'Université Queen's

Des recherches sur les nanotechnologies ont été poursuivies à Queen's par trois professeurs, deux du département de physique et un du département de génie métallurgique et des matériaux, ce dernier étant maintenant rendu à l'Université de Toronto.

Travaux sur les couches minces

En physique des matériaux, leurs travaux ont porté sur la fabrication de couches minces nanostructurées à l'aide de nouvelles techniques de dépôt, alors que le groupe de recherche en nanophysique s'est intéressé à la croissance par autoassemblage de fils atomiques sur des surfaces de silicone et à l'examen de la topographie à l'échelle atomique de ces systèmes, en plus de consacrer des efforts à la construction d'appareils de microscopie, par exemple celle d'un microscope STM.

L'Université d'Alberta

À l'Université d'Alberta, des recherches sur les nanotechnologies ont été réalisées au Centre for Nanoscale Physics ainsi qu'aux départements de chimie, de génie électrique et informatique, et de génie chimique et des matériaux. Le centre comptait, durant les années 1990, une dizaine de professeurs, une trentaine d'étudiants gradués et de chercheurs post-doctoraux. En outre, depuis avril 1999, la communauté universitaire dispose de plus de 3 M \$ d'équipement pour la micro- et la nanofabrication.

Centre for Nanoscale Physics

Au Centre for Nanoscale Physics, des recherches expérimentales et théoriques ont été menées par quelques équipes de chercheurs. L'Ultrafast Microscopy Group a travaillé au développement de la microscopie STM ultrarapide, sur la magnétisation des matériaux ferromagnétiques et sur l'entreposage magnétique de l'information. L'Ultrafast Spectroscopy Lab s'est intéressé aux propriétés optiques non linéaires des polymères et des points quantiques et à l'étude spectroscopique des nanostructures. En physique de la matière condensée, les recherches ont couvert la synthèse et les propriétés des nanocristaux, la caractérisation des nanoparticules métalliques semi-conductrices ainsi que la formation de piliers et d'hélices, par dépôt en rotation, pouvant être utilisés en photonique et pour l'entreposage de données à très haute densité. Des études ont aussi été menées sur la supraconductivité des couches minces à des températures élevées, sur la théorie de la supraconductivité à l'échelle nanométrique, sur la chimie et la physique des surfaces de même que sur la modélisation par ordinateur de nanomatériaux.

Département de chimie

Au département de chimie, des recherches ont été faites sur le développement des techniques de microscopie SPM, sur le dépôt électrochimique de nanoparticules d'or à la surface d'une électrode de carbone chimiquement sensible, sur la synthèse de nouveaux polymères en vue de la microfabrication de biosenseurs, sur le transport à l'intérieur des polymères, sur la synthèse chimique de matériaux nanostructurés, sur les processus optoélectroniques, sur la construction de nanofils semi-conducteurs et, enfin, sur la caractérisation de molécules biologiques et de polymères industriels par la spectrométrie de masse. Au département de génie électrique et informatique, le Laser Plasma Interactions Group s'est intéressé au dépôt de couches minces et de nanostructures, alors que

l'Ultrafast Photonics Laboratory a considéré l'imagerie à l'échelle nanométrique, par l'emploi de lasers ultrarapides. Au département de génie chimique et des matériaux, les recherches ont porté sur l'ingénierie de nanocomposites magnétiques mésoporeux et sur la caractérisation des couches ultraminces par la gravure nanométrique et la nanoindentation (usure des matériaux).

L'Université McMaster

Brockhouse Institute for Materials Research

Réunis au sein du Brockhouse Institute for Materials Research, une dizaine de professeurs de McMaster rattachés aux départements de physique et d'astronomie, de chimie, de génie chimique, de génie des matériaux et de génie physique ont consacré en partie leurs énergies à des recherches sur les nanotechnologies au cours des années 1990.

Ils ont mené des recherches théoriques et pratiques sur les zéolites, sur le développement de nouveaux types de membranes pour la nanofiltration, sur les matériaux semi-conducteurs et les nanostructures pour des applications en optoélectronique, sur l'application de la physique quantique et de la physique non linéaire à l'électronique quantique.

L'Université Simon Fraser

Nano-Imaging Facility

L'Université Simon Fraser comptait une dizaine de professeurs, œuvrant en partie sur les nanotechnologies est rattachés aux départements de physique et de chimie au cours des années 1990. Le Nano-Imaging Facility a mis à la disposition des chercheurs des instruments de haute résolution pour la caractérisation nanoscopique des matériaux.

On a mené des recherches sur les puits quantiques au MOCVD Research Lab et sur les hétérostructures pouvant servir de transistor au Compound Semiconductor Device Laboratory. Des recherches ont aussi été faites sur la physique et la spectroscopie des hétérostructures et des nanostructures, sur les surfaces et les interfaces, ainsi que sur la préparation photochimique de matériaux nanostructurés. Enfin, des études théoriques ont été menées sur les nanostructures semi-conductrices et sur les appareils nanoélectroniques.

3.2 La recherche dans les laboratoires fédéraux du CNRC

Ce sont principalement deux instituts du CNRC, tous deux situés à Ottawa, qui poursuivent des recherches importantes dans le domaine des nanotechnologies, soit l'Institut Steacie des sciences moléculaires et l'Institut des sciences des microstructures.

Institut Steacie

L'Institut Steacie, créé en 1990, a reçu pour mission d'effectuer des recherches interdisciplinaires aux frontières de la science moléculaire. Son expertise s'étend de la synthèse chimique à la caractérisation des matériaux, en passant par la compréhension de la chimie des processus biologiques, la prédiction des propriétés des matériaux et l'utilisation des lasers femtoseconde dans les secteurs de l'optique et des télécommunications.

Découverte en électronique moléculaire

Les chercheurs de l'Institut ont récemment fait leur marque dans le domaine des interfaces moléculaires, grâce à une percée en électronique moléculaire. Leurs résultats, parus dans la prestigieuse revue *Nature* en juillet 2000, portaient sur l'autoassemblage, à l'échelle nanométrique, d'un fil composé de molécules de styrène sur une surface de silicium, c'est-à-dire sur le matériau de base des semi-conducteurs actuels. Après quatre ans d'efforts, ces résultats laissent entrevoir la possibilité de construire des transistors à partir de molécules chimiques nanoscopiques, ce qui augmenterait de façon spectaculaire la densité et la puissance de traitement des ordinateurs.

L'Institut des sciences des microstructures (ISM) veut être à l'avant-garde dans le développement de technologies de l'information, notamment celles reliées aux besoins futurs de matériel pour le traitement, la transmission, l'acquisition et l'affichage d'informations. Ses champs de spécialisation comprennent les dispositifs optoélectroniques et leur intégration, les matériaux semi-conducteurs et leur traitement, les nanodispositifs, les technologies des couches minces et, enfin, l'acoustique.

Points quantiques

En fait, l'ISM explore des domaines particuliers des nanotechnologies, par exemple celui des points quantiques. Ses chercheurs ont réussi à hausser progressivement le nombre d'électrons et de trous qui habitent un point quantique, créant ainsi des atomes artificiels. Les points quantiques peuvent être utilisés dans des lasers semi-conducteurs. Comme ils dégagent moins de chaleur que les dispositifs traditionnels, il est possible de les condenser pour former des réseaux et finalement des dispositifs de taille inférieure. Ces lasers à points quantiques accéléreront la transmission de données au moyen de réseaux de fibres optiques et, à plus long terme, ils pourront être utilisés pour améliorer la mémoire optique.

Domaines de recherches de l'ISM

L'ISM travaille à l'intérieur d'un consortium comprenant de nombreuses universités et centres de recherche tant au Canada qu'à l'étranger. Ainsi en est-il de sa collaboration avec des chercheurs de l'Université de Wurzburg sur les points quantiques. L'ISM fait également partie de CERION (Canadian-European Research Initiative on Nanostructures) qui regroupe huit organisations canadiennes, dont l'Université de Sherbrooke. Cette entente encourage les collaborations entre chercheurs canadiens et européens, collaborations qui se traduisent par des échanges de visiteurs, des projets communs et des ateliers annuels.

L'ISM recherche activement des partenariats avec les entreprises canadiennes, en leur offrant ses services, notamment sous la forme d'un recouvrement des coûts encourus. L'ISM possède des installations modernes pour la mise au point de nouveaux matériaux à base de couches minces et pour l'analyse de leur comportement dans les champs de la supraconductivité, de l'optique, etc. Les chercheurs de l'ISM s'intéressent également à la nano-optique et à la nano-électronique.

Création par le CNRC d'un Institut en nanotechnologies en Alberta

Il semble que le gouvernement fédéral s'apprête à annoncer la création d'un institut du CNRC spécialisé en nanotechnologies²⁶ sur le campus de l'Université d'Alberta, à Edmonton. Son investissement se situerait entre 50 M \$ et 60 M \$; le gouvernement albertain fournirait un montant

26. Voir *Research Money*, March 19, 2001.

équivalent, portant l'investissement total à une hauteur de 100 M \$ à 120 M \$. Le CNRC a choisi lui-même la localisation de son institut par souci d'une meilleure répartition géographique de ses centres, l'Alberta en étant jusque-là dépourvue. Il s'agit donc là d'un investissement concerté en vue de stimuler la recherche dans cette province.

3.3 La recherche dans les universités québécoises

Ce sont principalement cinq universités québécoises qui interviennent actuellement dans le domaine des nanotechnologies. Il s'agit de l'Université de Montréal et son École polytechnique, de l'Institut national de la recherche scientifique, de même que des universités McGill, Sherbrooke et Laval.

L'École polytechnique et l'Université de Montréal

L'Université de Montréal et l'École polytechnique disposent de quelques équipes de recherche dans le domaine de la nanoscience et des nanotechnologies. Au total, une quinzaine de professeurs effectuent actuellement des recherches. D'ici à cinq ans, ces deux établissements veulent recruter quinze nouveaux professeurs en nanotechnologies, dont plus de la moitié seront titulaires de Chaires de recherche du Canada.

Pour l'instant, on peut regrouper leurs activités de recherche sous les thèmes suivants : les nanomatériaux, la nanoélectronique et la nanophotonique, la nanobiologie et les nanosystèmes.

Les approches top down et bottom up
employées

Dans le domaine des nanomatériaux, les chercheurs exploitent l'approche descendante (*top down*) pour créer de nouvelles structures, pour étudier leurs propriétés et pour fabriquer des nanodispositifs. Quant à l'approche ascendante (*bottom up*) elle est exploitée pour obtenir des nanostructures de formes prédéterminées à partir de blocs d'assemblages organiques possédant des points d'adhésion ordonnancés. Une fraction importante des efforts de recherche est dirigée vers la conception et la synthèse de molécules autoassembleuses. Ces matériaux nanostructurés forment par exemple la base de nanodispositifs micro- et optoélectroniques.

Nanoélectronique

Dans le domaine de la nanoélectronique, les chercheurs de l'École développent des structures à points, fils et puits quantiques à base de semi-conducteurs. Ils caractérisent leurs propriétés et élaborent de nouveaux dispositifs de haute performance pour les industries de la microélectronique et des télécommunications. L'intégration de nanomatériaux fonctionnels dans des senseurs, actuateurs, moteurs et dispositifs est le résultat attendu des chercheurs.

Modélisation et simulation numérique

Plusieurs chercheurs sont également très actifs dans les domaines de la modélisation et de la simulation numérique. L'université de Montréal vient de procéder à l'embauche de nouveaux professeurs pour renforcer son statut à l'échelle nationale et internationale. Elle pourra aussi compter sur la présence d'experts en calcul, en simulation et en modélisation.

La valeur des infrastructures actuelles en nanotechnologies et en microtechnologies est estimée à 20 M \$ à l'Université et à l'École. Au cours des deux dernières années, elles ont obtenu 50 M \$ de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) ainsi que du gouvernement du Québec pour des équipements pouvant servir en nano- et microtechnologies. Ces équipements vont également servir à d'autres secteurs de recherche, comme la métallurgie et la biologie.

L'Institut national de la recherche scientifique (INRS)

Programme de recherche

Sept professeurs travaillent actuellement en nanotechnologies à l'INRS. L'institution s'est fixée comme objectif de recruter sept professeurs en nanotechnologies au cours des années à venir. Le programme de recherche de l'INRS-Énergie et Matériaux touche à l'heure actuelle principalement le domaine des nanomatériaux soit :

- (i) Le développement et la caractérisation des nanoparticules métalliques en utilisant des procédés laser ou des méthodes plus classiques (p. ex. : broyage mécanique).
- (ii) Le développement et la caractérisation de nanotubes de carbone produits par des procédés laser, des plasmas thermiques ou des méthodes chimiques. Le défi réside dans la production de masse de nanotubes à une seule paroi.
- (iii) La production de matériaux auto-nanostructurés tels que les réseaux de cratères en surface, les réseaux de bulles ou de cavités sous la surface et les nanoprécipités.

Applications envisagées

Parmi les applications envisagées, citons, dans le domaine de l'énergie, le stockage de l'hydrogène, les nouveaux types de batteries et les pompes thermochimiques, dans celui des industries chimiques, le développement de nouveaux catalyseurs permettant d'accroître l'efficacité énergétique des usines de transformation chimique et, dans le domaine de l'environnement, le développement de nouveaux senseurs à gaz.

Tout en renforçant l'axe des nanomatériaux, l'INRS prévoit développer les axes de procédés d'autoassemblage et de dynamique structurale ultrarapide appliqués aux nanosystèmes.

Valeur des équipements

La valeur des équipements déjà installés en nanotechnologies est de 1 M \$ et de 6 M \$ en microtechnologies. Au cours des dernières années, l'INRS a reçu 0,5 M \$ de la FCI pour des équipements en nanotechnologies et 0,66 M \$ pour d'autres équipements en microtechnologies. L'INRS pilote actuellement une demande regroupant les universités de Montréal, McGill, Sherbrooke et Laval, en vue d'obtenir 15 M \$ de la FCI pour des équipements en lithographie.

L'Université de Sherbrooke

CERPEMA et l'IMSI

Les activités de recherche sur la nanoscience et sur les nanotechnologies menées à l'Université de Sherbrooke sont principalement le fait de l'Institut des matériaux et des systèmes intelligents (IMSI). L'IMSI a vu le jour en 1999 grâce à des subventions de 15 M \$ provenant de la FCI, du ministère québécois de la Recherche, de la Science et de la Technologie et de la Fondation de l'Université de Sherbrooke (dont environ 5 M \$ pour les nano- et microtechnologies). Le Centre de recherche sur les propriétés électroniques de matériaux avancés (CERPEMA) est un des groupes de recherche ayant contribué à la mise sur pied de l'IMSI et dont les travaux de recherche sont fortement axés sur la nanoscience et les nanotechnologies.

Travaux de recherche

Les travaux sur les nanostructures semiconductrices sont en cours depuis plusieurs années au CERPEMA. D'autres travaux ont débuté récemment (des études théoriques sur les nanotubes, par exemple) ou sont actuellement dans une phase de démarrage. Dix-huit chercheurs participent à ces travaux, en étudiant soit les structures nanométriques, soit les matériaux de base utilisés dans la réalisation de ces structures. Les principaux domaines de recherche sont les nanostructures semiconductrices, les nanostructures supraconductrices (en développement) et les couches organiques autoorganisées. Il se fait également des études théoriques sur les nanotubes de carbone. D'autres équipes de recherche actives au sein de l'IMSI effectuent des travaux sur les nanotechnologies, qui incluent notamment l'étude de matériaux nanocomposites, de poudres nanométriques (dont les poudres à base de carbone, les fullerènes, les nanotubes), de catalyseurs à base de nanocristaux métalliques, de nanopolymères et de nanostructures biologiques.

Équipements

Les chercheurs disposent d'un équipement abondant, dont 200 m² de salles blanches, ainsi que des salles de préparation d'échantillons. Les travaux théoriques et les simulations numériques bénéficient d'un accès à des moyens de calcul de pointe. La valeur des équipements du CERPEMA en nanotechnologies est d'environ 10 M \$ et de 15 M \$ si on inclut les équipements en microtechnologies.

Recrutement récent de plusieurs professeurs

Depuis 1998, au moins cinq nouveaux professeurs spécialisés en nanotechnologies ont été recrutés au département de génie électrique et de génie informatique. De plus, l'Université prévoit le recrutement de professeurs dans les secteurs de la nanoscience et des nanotechnologies, qui correspondra aux priorités du CERPEMA.

À l'Université de Sherbrooke, et particulièrement dans son département de physique, on met donc l'accent sur les nanotechnologies, ce qui devrait permettre d'accroître de manière significative sa contribution au développement de ce secteur dans les prochaines années.

L'Université McGill

L'Université McGill a été l'université québécoise la plus active dans le domaine des nanotechnologies au cours de la dernière décennie. Ce sont avant tout des travaux reliés à l'instrumentation qui ont constitué le cœur des recherches; on entend essentiellement s'y appuyer pour explorer plu-

	sieurs champs nouveaux au cours des prochaines années. Une douzaine de professeurs se sont spécialisés dans le secteur, à temps plein ou à temps partiel. Certains chercheurs font partie de réseaux internationaux réputés, notamment ceux des laboratoires d'IBM.
<i>Une contribution originale à l'instrumentation</i>	L'Université McGill a apporté une contribution appréciable au développement de l'instrumentation propre aux nanotechnologies, notamment en ce qui a trait aux microscopes MFM (Magnetic Force Microscopy) et AFM.
<i>Recherches en cours</i>	Les recherches en cours sont très diversifiées et touchent plusieurs domaines. Par exemple en 1999, l'installation d'un microscope AFM a permis à une équipe de chercheurs d'étudier les propriétés mécaniques de cellules vivantes, plus particulièrement la force des liens entre les molécules individuelles ainsi que la conductivité électrique de canaux d'ions sur les membranes cellulaires. Cette équipe était composée de chercheurs en physiologie, en pharmacologie et d'autres rattachés à des hôpitaux universitaires. Un microscope AFM a également servi à l'étude des neurones d'un rat. L'emploi d'un microscope SNOM a soutenu l'étude de la distribution de la lignine dans les fibres d'épingle durant sa transformation en pâte pour l'industrie papetière. On peut mentionner, enfin, le développement de senseurs chimiques micromécaniques combinant la technologie du cantilever AFM avec la chimie de molécules d'alkane-thiole autoassemblées.
<i>Équipements</i>	L'Université McGill a obtenu récemment une subvention de 9,4 M \$ de la FCI en vue d'établir un groupe de recherche formé d'ingénieurs électriques, de chimistes et de physiciens, axé sur les nanotechnologies. La subvention permettra d'acquérir et de combiner différents microscopes (AFM, STM, SEM), de même que des ordinateurs très puissants à des fins de modélisation. De plus, 5,5 M \$ seront consacrés à une installation de micromachinerie qui nécessitera un espace de 300 mètres carrés de surface. La valeur actuelle des équipements qui servent en priorité aux nanotechnologies est de 20 M \$.
<i>Simulations et modélisation</i>	Quelques chercheurs effectuent des simulations théoriques et de la modélisation. Les objets sont nombreux. Mentionnons : les nanotubes de carbone, les points quantiques, les fils atomiques, les phénomènes de friction et ceux d'interaction entre surfaces de différents matériaux. Notons enfin qu'au cours des prochaines années l'Université McGill prévoit embaucher une douzaine de professeurs spécialisés en nanotechnologies.
	<i>L'Université Laval</i>
<i>Secteurs de recherches</i>	Les recherches en cours à l'Université Laval portent principalement sur les zéolites et sur les tamis moléculaires mésoporeux ainsi que sur différents hydrures métalliques nanocristallins en vue de l'entrepilage de l'hydrogène. Dans le secteur des zéolites, les projets visent l'étude des méthodes de synthèse de ces matériaux, et de leurs relations, de même que les conditions de préparation de leurs propriétés physico-chimiques et catalytiques. On se penche également sur différentes applications de ces solides comme catalyseurs et comme adsorbants industriels, un projet

d'utilisation de ces matériaux pour la fabrication de membranes céramiques étant en préparation. Plusieurs autres projets, en cours ou en préparation sont conçus pour avoir des retombées industrielles dans les domaines de l'incinération catalytique, des noirs de carbone pyrolytiques et de la synthèse de nouveaux carburants diesels à partir du gaz naturel.

*Futurs domaines
de recherche*

Les activités de recherche à venir sur les nanotechnologies à l'Université Laval portent principalement sur les nanostructures de matériaux organiques et sur la recherche en photonique. Le transport électronique dans les polymères et dans les matériaux organiques est aujourd'hui un champ de recherche très actif.

*Secteur de la
nanophotonique*

Dans le secteur de la photonique, l'Université Laval dispose d'une grande expertise. Elle abrite le COPL (Centre d'optique, photonique et laser) qui regroupe des chercheurs des départements de physique, de génie électrique et de génie informatique et qui est reconnu au Canada comme l'un des centres les plus importants en photonique. Cependant, jusqu'ici les travaux de recherche liés à la nanophotonique ont été pratiquement inexistants au COPL. Les chercheurs canadiens les plus actifs en nanophotonique se trouvent dans des universités de l'Ontario (Toronto en particulier), de la Colombie-Britannique et de l'Alberta. C'est pourquoi des chercheurs de Laval se sont associés à ceux de Sherbrooke, de McGill et de l'Université de Montréal, en vue de développer des projets en nanophotonique. Le regroupement comprend plus d'une dizaine de chercheurs.

3.4 L'initiative de Valorisation-Recherche Québec sur les nanotechnologies

*Demandes adressées
à VRQ*

Au cours de la dernière année, les universités québécoises ont adressé à Valorisation-Recherche Québec (VRQ) plusieurs demandes de financement liées au domaine des nanotechnologies. Il faut savoir, à ce propos, que les programmes de la FCI couvrent 40 % de la subvention demandée, laissant aux gouvernements provinciaux et aux institutions requérantes le soin de financer la différence. VRQ est devenue l'intermédiaire financier auquel a recours le gouvernement du Québec depuis 2000 pour fournir sa contrepartie aux subventions de la FCI.

*Rapport déposé
auprès de VRQ*

Afin de maximiser les retombées de ses interventions, VRQ a confié à un consultant le soin d'explorer avec les chercheurs et les universités concernés la meilleure stratégie de soutien en matière de nanotechnologies. Le rapport qui en résulte formule un ensemble de propositions, dont la principale consiste à créer Nano-Québec, un organisme voué au développement de la recherche sur les nanotechnologies dans les universités québécoises.

*10 M \$ destinés à
Nano-Québec*

Par la création de Nano-Québec, VRQ vise à élaborer et mettre en œuvre un plan concerté de déploiement de la recherche sur les nanotechnologies dans un réseau performant. Pour y parvenir, VRQ a accordé, en avril 2001, la somme de 10 M \$ à cet effort pour les trois prochaines années.

<i>L'utilisation des fonds</i>	Les fonds octroyés serviront à financer trois grands volets : • Financer les opérations des installations de recherche dans les universités par l'apport de personnel technique. • Soutenir des projets de recherche interdisciplinaire sur les nanotechnologies en y intégrant des étudiants post-doctoraux. • Promouvoir la collaboration et les interactions entre chercheurs et voir au bon fonctionnement du réseau.
<i>Les universités s'engagent à recruter</i>	Actuellement, l'enquête de VRQ auprès des universités conclut qu'environ 68 professeurs- chercheurs sont actifs en nanotechnologies dans les universités québécoises concernées. Celles-ci ont pris l'engagement, avec la création de Nano-Québec, d'embaucher 54 professeurs supplémentaires au cours des années à venir. Le recrutement des nouveaux professeurs se fera en concertation afin d'assurer le développement optimal du réseau.
<i>Les infrastructures en place</i>	Déjà, plusieurs installations majeures d'une valeur de 68 M \$ sont en place dans les universités et d'autres demandes pour les infrastructures, évaluées à 60 M \$, seront déposées au cours des prochaines années.
<i>Domaine de recherche privilégiés</i>	Les activités de recherche menées sous l'égide de Nano-Québec viseront la conception de nouveaux nanomatériaux et de nouvelles nanostructures, le contrôle et la caractérisation de leurs propriétés, ainsi que leur intégration dans des structures plus complexes. La réalisation de nanosystèmes requerra l'extension des techniques de fabrication existantes, de même que l'introduction de nouvelles technologies.
<i>Les approches et domaines</i>	Les approches, les méthodologies et les domaines thématiques suivants, intimement liés les uns aux autres, sont considérés comme étant primordiaux pour le réseau : A – Les approches et les méthodologies essentielles au domaine des nanomatériaux structurés : • assemblage des nanomatériaux; • élaboration de nouvelles méthodes de fabrication et de caractérisation; • modélisation et simulation des propriétés physiques et chimiques. B – Les domaines thématiques retenus pour les applications : • nanomatériaux; • nanosystèmes; • nanoélectronique et nanophotonique; • nanobiologie.

*La structure de prise
de décision*

La gestion de Nano-Québec sera assurée par un conseil d'administration qui comprendrait 13 membres, soit six issus des universités partenaires et sept autres provenant de l'extérieur. Le conseil d'administration aura la responsabilité de déterminer les orientations stratégiques, de procéder à l'attribution formelle des fonds tenus en fiducie aux projets sélectionnés par le conseil scientifique et d'élaborer un plan pluriannuel d'embauche de professeurs dans les programmes liés à Nano-Québec.

*Un comité d'experts
internationaux*

Nano-Québec se dotera d'un comité d'experts internationaux qui devra évaluer périodiquement la programmation scientifique et fera rapport au conseil d'administration. Un chercheur principal aura la responsabilité d'un des domaines de recherche retenus et sera assisté par un chercheur d'une autre université. Ces responsables et coresponsables formeront le comité scientifique interne de l'organisme.

3.5 Les constats généraux

- Le Canada et le Québec accusent un sérieux retard dans le champ des nanotechnologies par rapport aux États-Unis, au Japon et aux pays européens.
- Seuls deux instituts de recherche du CNRC sont actuellement actifs en nanotechnologies : l'Institut Steacie et L'Institut des sciences des microstructures. La décision a déjà été prise, semble-t-il, d'implanter en Alberta un institut du CNRC voué aux nanotechnologies.
- Les recherches dans les universités québécoises doivent s'accélérer au cours des années qui viennent si le Québec veut faire partie des nations les plus dynamiques. Plusieurs chercheurs et groupes de recherche universitaires le souhaitent et manifestent leur intention de s'engager dans cette voie. Les subventions importantes accordées conjointement à plusieurs regroupements par la FCI et le gouvernement du Québec devraient leur permettre de concrétiser, du moins partiellement, leurs efforts.
- La création de Nano-Québec, à un moment charnière, est susceptible d'appuyer à court terme les universités afin qu'elles intensifient la recherche. Autre avantage non négligeable : Nano-Québec favorisera la concertation et la mise en réseau des principaux chercheurs québécois.
- En somme, le Québec et le Canada disposent d'un potentiel intéressant aussi bien dans les universités que dans les laboratoires fédéraux pour accélérer la recherche au cours des prochaines années. La position du Québec demeure cependant fragile et demande que des ressources financières importantes soient consenties par les deux paliers de gouvernement.

Une stratégie à la hauteur des enjeux

L'objet du premier chapitre

La lecture du premier chapitre a permis de saisir l'étendue des bouleversements scientifiques introduits par les nanotechnologies. Encore perçues comme un champ de recherche parmi d'autres, et pourtant objet de percées spectaculaires et difficiles à compiler tant leur rythme s'accélère, les nanotechnologies s'annoncent proprement révolutionnaires : puisqu'elles permettent d'agir sur la matière à l'échelle atomique, d'en modifier les caractéristiques et les propriétés, elles auront des incidences sur les fondements scientifiques de toutes les disciplines des sciences naturelles et du génie, et par extension de toutes les technologies qui en découleront.

L'objet du chapitre 2

Le chapitre 2 cherchait à mesurer l'expansion rapide et les modes d'organisation de la recherche à l'étranger, notamment aux États-Unis. On y constatait en particulier que l'essor des connaissances, et par voie de conséquence la renommée des centres et instituts scientifiques qui y contribuent, est étroitement relié au soutien gouvernemental consenti. En effet, les recherches en cours sont encore essentiellement de nature fondamentale. Les retombées industrielles attendues demeurent imprévisibles et s'annoncent au plus tôt dans 15 ou 20 ans, l'électronique et les télécommunications apparaissant comme les premiers utilisateurs futurs potentiels.

Le rôle central des gouvernements

Un pareil délai pour la livraison de produits commercialisables annule toute velléité d'une contribution autre que symbolique de la part du secteur privé, à l'exception des secteurs de l'électronique et des télécommunications. Même les universités américaines dotées de fonds propres parmi les plus élevés de la planète ne supportent qu'une fraction des coûts reliés au déploiement des infrastructures requises. À ce stade-ci des connaissances, les gouvernements deviennent ainsi responsables de l'émergence ou non d'un corpus scientifique original en nanotechnologies sur leur territoire.

L'objet du chapitre 3

Nous avons constaté au chapitre 3 le retard du Canada et du Québec dans ce champ, du moins jusqu'au printemps de 2001. Cette période coïncide avec l'annonce anticipée d'un nouvel institut du CNRC en territoire albertain et avec celle en avril, de la création de Nano-Québec par Valorisation-Recherche Québec²⁷. Si de pareilles décisions montrent que les deux paliers de gouvernement comprennent bien le rôle des nanotechnologies comme champ scientifique stratégique, elles ne suffisent pas, du moins au Québec, pour garantir à long terme l'existence d'un pôle de recherche concurrentiel et à l'avant-garde, apte à engendrer des retombées rapides et diversifiées au sein de l'économie québécoise.

27. L'Université de Toronto prévoirait le dépôt d'un projet similaire à celui promu par le Conseil de la science et de la technologie du Québec, mais il a été difficile d'en confirmer la nature.

A – Les enjeux et les atouts du Québec

Des enjeux stratégiques

Les enjeux pour le Québec sont à la mesure de la révolution pressentie et peuvent être résumés comme suit :

Participer à l'essor de la nanoscience

1) Assurer la participation du Québec à l'essor du corpus scientifique sur les nanotechnologies. La communauté scientifique québécoise est réputée pour la qualité de ses travaux dans plusieurs secteurs de pointe. Elle ne peut s'exclure de cette nouvelle révolution sans craindre que le Québec ne devienne un acteur de second ordre dans un nombre insoupçonné de disciplines.

Constituer une masse critique

2) Constituer une masse critique de chercheurs de haut calibre dans toutes les disciplines visées par les nanotechnologies – physique, chimie, biochimie, génie, mathématiques, informatique – à l'intérieur de créneaux prioritaires pour chacun des grands domaines que sont les matériaux, l'électronique, l'optique-photonique, les nanobiotechnologies et l'instrumentation. En raison de la multiplicité des disciplines et des domaines concernés, la masse critique semble exiger, aux États-Unis notamment, un nombre compris entre 50 et 100 chercheurs à temps plein.

Maximiser les synergies

3) Maximiser les synergies entre les chercheurs de toutes les disciplines et universités concernées, entre eux et les laboratoires gouvernementaux, de même qu'avec le milieu industriel.

Acquérir les équipements requis et financer leur fonctionnement

4) Procurer à ce groupe de chercheurs les équipements dont ils ont besoin pour mener à bien leurs travaux, en assurer l'entretien, le fonctionnement et le renouvellement, au fur et à mesure des percées technologiques qui surviendront dans le futur. Les investissements requis sont massifs, d'autant plus que le Québec accuse du retard quant aux installations déjà en place. En effet, les instituts et centres américains renommés en nanotechnologies livrent un message clair : chacun dispose déjà d'infrastructures physiques (immeubles et équipements) d'au moins 100 M \$, sans compter les coûts de fonctionnement qui doivent être financés sur une base permanente.

Attirer les étudiants

5) Attirer des étudiants et former une main-d'œuvre de calibre international, d'une part pour atteindre la masse critique recherchée et, d'autre part, pour combler les besoins en main-d'œuvre des entreprises spécialisées en électronique, photonique et biotechnologie, de même que ceux des entreprises à naître qui se lanceront dans l'exploitation directe des technologies dérivées.

Consolider les secteurs industriels reliés

6) Consolider les secteurs industriels de pointe au Québec car ils devront intégrer le plus rapidement possible les percées scientifiques en vue s'ils veulent demeurer concurrentiels à l'échelle mondiale, de même que susciter l'apparition de nouvelles entreprises, voire de secteurs industriels dont l'existence sera étroitement reliée à l'exploitation des découvertes projetées. Le souci de diffuser et de transférer les nouvelles connaissances vers le milieu industriel devra être constant.

Garantir une gestion efficace

- 7) Garantir une gestion efficace des fonds publics qui seront injectés, afin de réduire les risques encourus par une opération de cette envergure, d'une part les risques scientifiques puisque toutes les issues ne seront pas prometteuses et, d'autre part, les risques financiers.

Ces enjeux apparaissent d'autant plus exigeants qu'ils sont intimement reliés et ne permettent pas de demi-mesure, l'ampleur des infrastructures requises fixant un plancher à la taille du projet à réaliser.

Un projet global

En effet, il est inutile de vouloir acquérir une fraction seulement des équipements requis sans invalider la capacité des chercheurs à obtenir des résultats concluants. Mais aussi, ne réunir qu'un groupe restreint de chercheurs, aussi bien équipés soient-ils, introduit également un risque inutile : des disciplines non représentées ou des créneaux sous-explorés limiteront les probabilités de découvertes intéressantes; ils freineront les collaborations possibles avec les centres étrangers les plus performants, ou encore l'intérêt des chercheurs ou des étudiants les plus doués à devenir membres du réseau.

Qui peut être mené par étape

Le projet qui sera finalement retenu doit être vu comme un projet global, à endosser dans son intégralité, même s'il peut être mené par étapes successives, de manière à minimiser à chacune d'elles les risques à encourir.

Des atouts précieux

Or, le Québec peut déjà miser sur des atouts précieux. Ainsi :

Une soixantaine de chercheurs québécois déjà actifs

- 1) Le Québec compte une soixantaine de chercheurs en nanotechnologies dans plusieurs de ses universités; certains d'entre eux ont déjà acquis une renommée à l'échelle mondiale. Ce bassin initial correspond à une trentaine de personnes à temps plein car plusieurs n'y consacrent encore qu'une partie de leur temps. Une certaine prudence pouvait expliquer ce choix : aussi longtemps que le risque de réussite scientifique demeure élevé, un chercheur préférera mener de front plusieurs projets dans des champs différents. Ce phénomène devrait se résorber, d'une part avec l'expansion du champ scientifique porté par les nanotechnologies et, d'autre part, par la confirmation d'une priorité politique reconnue au secteur.

La décision de VRQ

- 2) L'élément le plus positif et le plus structurant provient sans conteste de la décision qu'a adoptée le conseil d'administration de VRQ en avril 2001 et qui a été rapportée à la fin du chapitre précédent. En effet, cette décision garantit jusqu'en 2004 la couverture des frais de fonctionnement et d'entretien des équipements déjà acquis, le financement de stagiaires post-doctoraux, de même que la mise en réseau des chercheurs québécois, entre eux et au sein de la communauté scientifique internationale. Cette décision est cruciale pour le déploiement des nanotechnologies à court terme et témoigne à la fois du potentiel du secteur et de la place de ce secteur parmi les priorités scientifiques du Québec.

L'engagement des universités participantes

- 3) Un troisième élément consiste en une proposition officielle des cinq universités concernées qui a été adressée à VRQ. Celles-ci s'engagent non seulement à déployer une programmation de recherche commune,

au sein d'un organisme de gestion, mais aussi à assurer, en concertation, l'embauche de 54 professeurs supplémentaires. Pareille entente est un gage puissant de réussite en vue d'un développement rapide et harmonieux de ce secteur.

B – Les recommandations du Conseil

Une décision de court terme

La décision de Valorisation-Recherche Québec (VRQ) constitue un point tournant de la recherche sur les nanotechnologies au Québec. Or, conformément au mandat donné, elle s'est concentrée sur les conditions à remplir à court terme afin de lancer un projet national d'envergure sous les meilleures auspices. Elle ne propose pas véritablement d'objectifs à long terme. Par ailleurs, même pour le court terme, l'entente venant à peine d'être confirmée, sa mise en œuvre peut rencontrer des obstacles; elle exigera une planification serrée et la clarification de plusieurs sujets encore généraux ou imprécis.

La nature des recommandations

Le Conseil de la science et de la technologie du Québec croit de son ressort de formuler des recommandations qui porteront sur :

- la constitution d'une masse critique de chercheurs au sein d'un réseau véritablement intégré de recherche à l'échelle québécoise;
- l'implantation des infrastructures physiques requises dans un pôle central auquel seront greffées deux antennes;
- la collaboration nécessaire du gouvernement fédéral à la réalisation de ce vaste chantier.

Urgence de doter le Québec d'un institut majeur sur les nanotechnologies

Ces recommandations découlent d'une prise de position sans équivoque de la part du Conseil de la science et de la technologie du Québec. En effet, grâce aux travaux qu'il a menés et qui ont été résumés dans les chapitres précédents, grâce également aux démonstrations qui lui ont été fournies par plusieurs experts québécois en la matière, **le Conseil affirme qu'il est fondamental et urgent pour le Québec de se doter d'un institut interuniversitaire de calibre international dans le secteur des nanotechnologies.** Pour mener à bien pareille entreprise, cet institut devra pouvoir compter sur des conditions comparables à celles des instituts de même nature, notamment aux États-Unis. Par ailleurs, le Conseil suggère que les infrastructures acquises soient également mises au service du secteur des microtechnologies. Cette stratégie permettra de tenir compte de la taille relative du Québec et des efforts qui seront demandés, de minimiser les risques encourus du fait de la nature même des recherches et de l'ampleur des investissements, finalement, de maximiser les retombées de pareils investissements au sein de la communauté scientifique.

B-1 – La constitution d'une masse critique en nanotechnologies

Réunir une masse critique de 50 à 80 chercheurs

La réunion d'une masse critique minimale de chercheurs permanents, entourés de chercheurs associés et invités, de stagiaires post-doctoraux et d'étudiants, apparaît une condition sine qua non de déploiement du secteur, notamment à cause des exigences liées à une approche obligatoirement interdisciplinaire de l'objet de recherche. Les nanotechnologies

sont en partie responsables de la convergence « organique » des sciences pures et appliquées annoncée par le milieu scientifique depuis quelques années. L'intention ferme, manifestée dès le départ, de réunir cette masse critique autour d'un projet majeur accroît en soi les chances de succès de l'opération, puisqu'elle servira d'élément moteur pour attirer des chercheurs québécois, encore hésitants à se lancer dans l'aventure; pour attirer également des chercheurs québécois actuellement à l'étranger et des chercheurs étrangers, tous devenus très exigeants quant à la qualité de l'environnement humain et physique dans lequel ils s'intègrent, de même que des étudiants doués et ambitieux. L'expérience acquise par les centres étrangers spécialisés en nanotechnologies suggère une masse critique minimale d'environ 50 à 80 chercheurs à temps plein. Comme le Québec compte déjà l'équivalent d'une trentaine de chercheurs à temps complet, l'engagement pris par les universités d'embaucher une cinquantaine de professeurs-chercheurs supplémentaires au cours des prochaines années, s'il se réalise, devrait permettre de rencontrer les exigences fixées. Les universités pourront miser, pour atteindre cet objectif, sur les postes accordés dans le cadre des Chaires de recherche du Canada, et sur le programme d'établissement de jeunes chercheurs du Fonds FCAR. Elles pourront également avoir recours aux budgets consentis dans le cadre des contrats de performance. Mais il est raisonnable de penser que le financement de ces postes n'est pas encore totalement assuré.

Programmation de recherche

En ce qui a trait aux chantiers thématiques ou méthodologiques qui seront couverts par la communauté scientifique, deux grands volets ont été retenus dans le cadre de la proposition soumise à VRQ et ils ont été mentionnés à la fin du chapitre précédent. Le Conseil n'est pas en mesure de confirmer ni d'infirmer ces choix mais ces derniers ont déjà fait l'objet d'un large consensus auprès des équipes déjà constituées. Ils vont par ailleurs dans le sens des attentes du Conseil, car l'établissement d'un programme de recherche commun et consensuel est une condition essentielle de réussite. Suivront normalement les étapes d'élaboration du contenu détaillé de ce programme, puis de renforcement de certains créneaux en fonction des percées relatives qui seront réalisées, de même qu'en fonction de leur transfert potentiel vers des secteurs industriels présents au Québec.

Recommandation 1

Que les universités et les gouvernements prennent toutes les dispositions nécessaires pour recruter et favoriser l'embauche de 54 professeurs-chercheurs spécialisés en nanotechnologies, prévue au plan soumis à VRQ.

Moyens

- En concevant puis déployant une stratégie commune et dynamique de recrutement, au Québec, au Canada et à l'étranger de chercheurs de haut calibre;

- En leur offrant un environnement de recherche stimulant, des conditions de travail concurrentielles et l'accès aux équipements et aux installations requis;
- En mettant à profit les programmes existants, comme ceux des Chaires de recherche du Canada et d'établissement de nouveaux chercheurs du Fonds FCAR et, si c'est nécessaire, en créant des programmes spécifiques à cette fin;
- En offrant des bourses à des étudiants québécois pour qu'ils puissent se former aux niveaux doctoral et post-doctoral dans les meilleurs centres de recherche étrangers, dans le but d'en recruter par la suite comme professeurs-chercheurs;
- En mettant sur pied un programme spécifique de bourses doctorales destinées aux étudiants qui voudront se spécialiser en nanotechnologies.

*La contribution
des sciences humaines
et sociales*

Le chantier en préparation est déjà très vaste, mais le Conseil souhaite dès maintenant attirer l'attention sur la nécessité que des chercheurs en éthique, de même qu'en sciences sociales et humaines en général, s'intéressent aux nanotechnologies. En effet, si révolution il y a, cette révolution ne pourra faire l'économie d'une analyse approfondie de ses impacts sur l'économie et la société, sur les processus de production et l'exploitation des ressources, sur la propriété intellectuelle, l'organisation du travail, les enjeux éthiques soulevés, etc.

B-2 – La constitution d'un réseau

*Il faut former un
réseau intégré et
cohérent*

Les nanotechnologies étant par essence interdisciplinaires, les chercheurs et leurs équipes doivent travailler en réseau, d'abord à l'intérieur même des universités, entre les différents départements et facultés, mais aussi entre universités ainsi qu'avec les laboratoires gouvernementaux, notamment ceux du CNRC. L'objectif recherché consiste à former un réseau cohérent et intégré à l'échelle québécoise. L'expertise du Québec en nanotechnologies demeurera trop restreinte pour qu'on tolère une dispersion des efforts et qu'on espère simultanément pouvoir concurrencer les centres étrangers, à la fois imposants par le nombre de leurs chercheurs et bien pourvus en ressources matérielles et financières.

*La contribution de
Nano-Québec*

L'établissement d'un tel réseau appelle la mise sur pied d'un organisme de coordination, de planification et de suivi, qui profiterait d'un soutien administratif. La création de Nano-Québec annoncée dans le cadre du projet soumis à VRQ satisfait à cette exigence. Elle offre également le triple avantage de donner une visibilité internationale aux recherches qui seront poursuivies, de maximiser les interactions avec les centres du reste du Canada et de l'étranger, de même que d'attirer des étudiants, stagiaires et invités, au sein du réseau.

*Une formation à
d'autres disciplines,
à l'intérieur des
programmes existants*

En ce qui a trait à la formation de chercheurs, les consultations menées dans le cadre de cet avis convergent pour reconnaître qu'il n'est pas opportun, du moins sur un horizon prévisible, de recommander la création de programmes spécifiques sur les nanotechnologies, à aucun des cycles

La désaffection des jeunes est un écueil

supérieurs. En effet, vu l'état actuel des connaissances, la meilleure formation exige plutôt la maîtrise d'une discipline scientifique comme la physique, la chimie, la biologie, l'informatique ou le génie. Toutefois, des cours ou blocs de cours particuliers dans les disciplines en interface sont indispensables. La spécialisation en nanotechnologies s'acquiert davantage au moment de mener des recherches doctorales, puis post-doctorales.

Un écueil risque par contre de survenir, à cause de la désaffection relative des jeunes à l'égard des carrières scientifiques et technologiques. Ce phénomène n'est pas propre au Québec, certes, mais constitue un handicap d'autant plus sérieux que la source d'approvisionnement des futurs chercheurs en nanotechnologies réside dans les sciences fondamentales et appliquées. Des efforts particuliers devront être réalisés pour contrer cette tendance.

Recommandation 2

Que les directeurs des différents départements, les doyens et les responsables de la recherche dans les universités déploient les moyens nécessaires pour favoriser les interactions entre les chercheurs et les étudiants, dans le champ des nanotechnologies.

Moyens

- En augmentant les interfaces entre chercheurs de différentes disciplines, départements et facultés dans le champ des nanotechnologies;
- En stimulant la réalisation de projets et de programmes de recherche à la fois interdisciplinaires, interuniversitaires, inter-sectoriels et internationaux;
- En créant des cours ou blocs de cours portant sur les nanotechnologies, en ouvrant les programmes disciplinaires à d'autres disciplines pertinentes;
- En encourageant activement les étudiants à mieux maîtriser les disciplines complémentaires aux leurs.

B-3 – La création de Nano-Québec

Nano-Québec verra à promouvoir le réseau auprès des gouvernements

Nano-Québec sera l'organisme tout indiqué, avec l'appui de ses membres, pour faire la promotion du réseau auprès des autorités gouvernementales québécoises et canadiennes, notamment pour en assurer un déploiement rapide, proposer l'acquisition des infrastructures et équipements requis, de même que calculer le niveau de financement nécessaire tant sur le plan de l'investissement initial que du fonctionnement.

*Il assurera la liaison
avec les partenaires*

De plus, Nano-Québec aura pour mission d'assurer la liaison entre le réseau et tous ses partenaires, notamment les entreprises intéressées à collaborer tôt à la réalisation de projets de recherche et celles susceptibles d'exploiter les résultats qui en découleront, lorsque le bassin de connaissances se traduira en produits technologiques à potentiel commercial.

Nano-Québec cherchera également à sensibiliser le grand public et les jeunes aux nouveaux horizons que leur ouvrent les nanotechnologies, de même qu'aux résultats qui seront le fait des penseurs en sciences humaines et sociales.

Recommandation 3

Que les universités et le gouvernement du Québec appuient concrètement la création de Nano-Québec.

Sa mission

Nano-Québec aura notamment pour mission de structurer les recherches qui seront menées au Québec autour d'une programmation commune, de favoriser le réseautage des chercheurs universitaires et gouvernementaux impliqués, d'assurer leurs liens avec les réseaux étrangers les plus performants, de même que de promouvoir les recherches en nanotechnologies auprès du milieu industriel, des jeunes et du public en général.

Moyens

- En collaborant activement à toutes les étapes de la mise en œuvre de Nano-Québec;
- En encourageant les professeurs-chercheurs de toutes les disciplines à œuvrer au sein du réseau, à se spécialiser dans les créneaux qui auront été jugés prioritaires, à collaborer à l'exécution du programme de recherche retenu et à former une relève de calibre mondial;
- En assurant un financement adéquat à Nano-Québec pour réaliser l'ensemble des activités reliées à sa mission, notamment une fois la subvention accordée par VRQ épuisée.

B-4 – La construction d'un institut interuniversitaire

*La nécessité
d'infrastructures
complètes*

Il est inconcevable d'attirer les chercheurs québécois et étrangers au sein d'un réseau intégré et efficace sans leur offrir les infrastructures physiques requises et le personnel spécialisé pour opérer et entretenir l'équipement. L'environnement de recherche doit être organisé de manière à rassembler tous les appareils et instruments majeurs requis par les recherches interdisciplinaires qui seront réalisées, les mettre à jour au rythme des découvertes en instrumentation et fournir le soutien professionnel et technique requis.

<i>Les lieux existants</i>	Il existe déjà des lieux de recherche importants au Québec, en particulier à Montréal et d'autres en émergence à Sherbrooke et Québec, comme l'a démontré le chapitre précédent. Plusieurs universités disposent d'installations valant au total une soixantaine de millions de dollars selon VRQ. À ce montant, il faudrait ajouter les subventions déjà accordées par la FCI et le gouvernement du Québec, qui n'ont pas encore été dépensées.
<i>Montréal, Sherbrooke et Québec</i>	Montréal compte sur la contribution de l'Université McGill, de l'Université de Montréal, de l'INRS et de l'École polytechnique. On retrouve à Sherbrooke l'Institut des matériaux et systèmes intelligents (IMSI), menant des activités reliées aux nanotechnologies. De même, l'Université Laval possède le Centre en optique, photonique et laser (COPL), très actif dans ses champs de compétence mais qui ne poursuit pas pour le moment de programme articulé en nanotechnologies. Une expertise en nanophotonique devient essentielle pour renforcer le pôle majeur reconnu à Québec en photonique.
<i>L'expérience étrangère : une vocation mixte</i>	Par ailleurs, on relève une constante à l'étranger : les nanotechnologies se sont développées dans des centres qui ne leur sont pas exclusivement dédiés, certains se consacrant, par exemple en Europe aux recherches sur les matériaux. En effet, des synergies naturelles surgissent entre les recherches conventionnelles et celles sur les nanotechnologies, lorsqu'elles nécessitent les mêmes équipements et la même expertise. Cela se vérifie par des liens entre microélectronique et nanotechnologies, (à l'Université Harvard, par exemple) ou encore entre ces dernières et les recherches sur les BioMEMS (à l'Université Cornell).
<i>Un centre avec deux antennes, dans deux grands secteurs</i>	À partir de ces considérations, le Conseil estime qu'il faut construire un institut de recherche interuniversitaire, dont le centre sera établi à Montréal et auquel se grefferont deux antennes, l'une à Sherbrooke et l'autre à Québec. Les installations de Montréal seront mises au service à la fois des nanotechnologies et des microtechnologies.
<i>Les équipements pourront servir aux microtechnologies</i>	En effet, plusieurs microtechnologies, que ce soit dans le domaine de l'électronique ou des MEMS, demandent le même type d'équipement que les nanotechnologies, par exemple des salles blanches à l'épreuve des vibrations, des microscopes à haute résolution, divers appareils de caractérisation. L'institut à créer favorisera donc le développement de deux secteurs moteurs au Québec, les micro- et les nanotechnologies. Le rapprochement des deux groupes de chercheurs sera scientifiquement fécond, les avancées des uns permettant d'alimenter celles des autres. De plus, un renforcement du soutien accordé aux microtechnologies favorisera l'avènement de retombées plus rapides qu'en nanotechnologies proprement dites.
<i>Nano-Québec comme gestionnaire</i>	L'institut pourra être géré par Nano-Québec, ce qui assurerait la participation des universités membres.
<i>Un institut d'une centaine de millions de dollars</i>	La construction d'un tel institut devrait coûter 100 M \$, dont le tiers en immobilisations et les deux tiers en équipement. L'institut aurait ainsi la taille des centres américains majeurs répertoriés. Les consultations menées au Québec dans le cadre du présent avis confirment la justesse du montant. De plus, un tel investissement serait susceptible de convaincre les plus réticents de se joindre au réseau.

*Le gouvernement
québécois comme
partenaire central*

Le gouvernement québécois doit être le partenaire central dans la création de l'institut. Mais l'ampleur des investissements envisagés nécessitera une participation financière substantielle du gouvernement fédéral, par l'intermédiaire de la FCI ou d'autres programmes. Il ne faudra pas attendre de contribution du secteur privé, sauf marginalement peut-être dans le secteur des microtechnologies puisque les recherches sont de nature encore trop fondamentale pour l'intéresser à investir dans la création de cet institut. De plus, les fondations universitaires ne sont pas comparables à celles de leurs homologues américaines et ne pourront donc pas apporter une contribution significative, d'autant plus qu'elles devront collaborer au financement récurrent de l'institut.

*Le financement
des coûts de
fonctionnement*

Les coûts d'immobilisation et d'équipement ne sont pas les seuls à considérer. Si l'on se fie à la pratique d'institutions comparables, les coûts fixes de fonctionnement de l'institut équivaldront à environ 5 M \$ par année et apparaîtront vraisemblablement au moment où la subvention accordée par VRQ sera épuisée. Différentes options existent : l'institut pourrait recevoir le statut de centre de liaison et de transfert (CLT) et obtenir ainsi un financement récurrent; ce statut confirmerait du même coup le mandat de diffusion (et éventuellement de transfert) des connaissances auprès des entreprises, mais aussi d'information auprès du public. Par contre, le mandat d'un CLT semble a priori très étroit eu égard à celui de l'institut. L'Institut national d'optique (INO) offre une autre solution plausible, et assurerait un co-financement fédéral-provincial. Une contribution du ministère de l'Éducation est également concevable puisque ce dernier est responsable des infrastructures universitaires et de leurs coûts d'entretien. Au cours des premières années, les coûts indirects pourront être supportés par la partie correspondante provenant de la subvention de la FCI mais cette avenue n'est que temporaire.

*Les financement
des programmes de
recherche*

Le financement des programmes de recherche sera assuré, comme le veut l'usage, par les grands organismes subventionnaires et, si possible, par des programmes supplémentaires du genre de Génome Canada. La participation des entreprises demeure là encore problématique. On se rappellera qu'ailleurs dans le monde, seules quelques grandes entreprises, surtout en électronique, contribuent au financement de projets reliés aux nanotechnologies. Lorsqu'un secteur comme celui-ci est en phase d'émergence, les collaborations s'établissent plutôt en sens inverse, les laboratoires universitaires accueillant des chercheurs industriels dans leur locaux. Par ailleurs, les microtechnologies sont davantage propices aux partenariats universités-entreprises, et ce dès le départ.

Un délai de 3 ans

Le délai séparant le moment de la prise de décision de celui de la livraison des installations physiques sera d'environ trois ans. Une solution devra être trouvée entre-temps, avec la collaboration des universités, pour que les programmes de recherche puissent démarrer sans délai, sans nuire pourtant au regroupement futur des équipements majeurs dans les mêmes espaces physiques.

Recommandation 4

Que le ministre délégué de la Recherche, de la Science et de la Technologie se porte responsable de l'implantation, d'ici trois ans, d'un centre majeur spécialisé en nanotechnologies et en micro-technologies au Québec.

Moyens

- En instituant sans délai un comité de travail composé des représentants de Nano-Québec et de leurs principaux partenaires et en lui confiant le mandat de concevoir un projet qui précisera notamment la vocation spécifique du pôle central et des deux antennes, à Québec et Sherbrooke, leur programme scientifique commun et leurs plans de travail, leurs besoins précis en termes matériels et financiers, les liens à établir entre l'institut et ses autres partenaires québécois, canadiens et étrangers, un montage financier et un calendrier réaliste;
- En s'assurant que ce comité de travail dispose des ressources nécessaires pour mener à bien son mandat;
- En obtenant l'appui de la ministre d'État responsable de la Recherche, de la Science et de la Technologie, puis la collaboration de ses collègues (ministre de l'Éducation du Québec, ministre de l'Industrie et du Commerce du Québec, ministre de la Culture et des Communications du Québec, ministre des Affaires municipales et de la Métropole) afin d'en assurer la réalisation et d'en accélérer les travaux;
- En obtenant la collaboration financière du gouvernement fédéral, à même les programmes existants ou dans le cadre d'un partenariat spécifique;
- En réunissant les fonds nécessaires non seulement pour la construction des infrastructures, mais aussi pour la couverture à long terme des coûts fixes récurrents de l'institut (entretien et réparation des bâtiments et de l'équipement, coûts indirects du programme de recherche, notamment pour le fonctionnement des machines et des appareils).

B-5 – Une contribution spécifique du gouvernement canadien

Les universités ne sont pas seules à être appelées dans l'aventure. Tous les pays qui marquent le pas sur les nanotechnologies mettent à contribution leurs laboratoires publics. Le Canada ne peut pas faire exception.

Il semble que le Conseil national de recherches Canada (CNRC) ait pris l'initiative d'établir un institut dédié aux nanotechnologies, à Edmonton en Alberta, mais cet effort ne peut suffire au Québec pour au moins deux raisons. D'abord, ce centre risque d'éprouver de sérieuses difficultés à développer les synergies nécessaires avec les universités québécoises, à cause de son éloignement géographique. La deuxième raison tient au fait que ce centre ne pourra pas couvrir tous les secteurs de recherche. Il devra

*Nouvel institut
du CNRC en
nanotechnologies
en Alberta*

*Une implication
de tous les instituts
de CNRC en
nanotechnologies*

cibler un nombre donné d'avenues, ce qui laissera d'immenses domaines à explorer en nanotechnologies. En fait, ce sont l'ensemble des laboratoires du CNRC qui doivent poursuivre des recherches sur les nanotechnologies, et ce, non seulement au Québec mais dans l'ensemble du Canada.

Aucun pays ne s'est contenté de créer un seul grand centre voué aux nanotechnologies, que ce soit au Japon, en France, en Allemagne ou aux États-Unis. Les deux centres du CNRC actuellement actifs au Québec, en biotechnologies et sur les matériaux, réalisent leurs travaux dans deux des trois grands domaines d'application des nanotechnologies. Il s'avère donc essentiel que ces deux instituts entreprennent un programme de recherche centré sur les nanotechnologies. Le cas des matériaux est particulièrement important. Le rôle de l'Institut des matériaux industriels (IMI) sera déterminant auprès d'une multitude d'entreprises, dans des secteurs industriels comme la métallurgie et les plastiques.

*Des budgets pour
les deux instituts
fédéraux*

Pour que ces deux instituts du CNRC puissent étendre leur programmation et couvrir les nanotechnologies, elles devront indéniablement avoir recours à des ressources supplémentaires. Les laboratoires fédéraux du Québec ont déjà établi de précieuses collaborations avec les chercheurs et les étudiants des universités, de même qu'avec les entreprises. Ils devront participer activement au réseau à bâtir.

*Un soutien global
du gouvernement
canadien*

De plus, le gouvernement canadien a pris de nombreuses initiatives spécifiques pour appuyer des domaines jugés prioritaires. L'hypothèse de faire de même pour les nanotechnologies et de rejoindre par là l'effort consenti par les gouvernements étrangers doit être envisagée.

Recommandation 5

Que le ministre délégué de la Recherche, de la Science et de la Technologie mène les démarches nécessaires pour que le gouvernement canadien contribue substantiellement au développement des nanotechnologies au Québec.

Moyens

- En menant des négociations auprès de ses homologues canadiens, de sorte :
 - que les ressources des instituts du CNRC augmentent;
 - que les instituts puissent mettre en œuvre un plan d'action stratégique dans les domaines de recherche à couvrir;
 - que soit conçu un programme de subvention, par exemple sur le modèle de Génome Canada;
 - que soit mise en œuvre toute autre initiative susceptible de consolider le déploiement d'un pôle d'excellence en nanotechnologies au Québec.

Annexe I

Membres du Conseil de la science et de la technologie

La présidente

Mme Hélène P. Tremblay

Les membres

M. Maurice Avery

Président

Soft Innove inc.

Mme Claude Benoît

Présidente et chef de direction

Société du Vieux-Port de Montréal

Directrice, Centre des sciences de Montréal

Mme Louise Dandurand

Vice-rectrice à la recherche, à la création et à la planification

Université du Québec à Montréal

M. Jean-Guy Frenette

Vice-président à la concertation sectorielle et adjoint au premier vice-président

Fonds de solidarité des travailleurs du Québec

M. Martin Godbout

Président

Hodran inc.

M. Pierre-André Julien

Professeur et titulaire de la Chaire Bombardier

Université du Québec à Trois-Rivières

Mme Nicole Lafleur

Directrice générale

Cégep de Lévis-Lauzon

M. Réginald Lavertu

Directeur général

Collège de Rosemont

M. Denis Poussart

Professeur – Département de génie électrique et informatique

Université Laval

M. Jean-Marc Proulx

Vice-président R-D

Groupe Conseil DMR inc.

Les membres observateurs

Mme Marie-France Germain

Sous-ministre adjointe à la planification

Ministère de la Recherche, de la science et de la Technologie

M. Michel Desrochers

Directeur général

Institut de recherche en biotechnologie

Annexe II

Membres du Comité sur les nanotechnologies

Le président

M. Michel Desrochers

Directeur général
Institut de recherche en biotechnologies

Les membres

M. Jean Beerens

Directeur du CERPEMA
Centre de recherche sur les propriétés électroniques
des matériaux avancés
Université de Sherbrooke

M. Mohamed Chaker

Directeur
INRS-Énergie et matériaux
Varennnes

M. Peter Grütter

Professeur – Département de physique
Directeur du Groupe SPM
(Scanning Probe Microscopy)
Université McGill

M. Moussa Hoummady

Président-directeur général
NanoBioGen inc.
Montréal

M. John Luong

Chercheur – Chef du groupe sur les biocapteurs
Institut de recherche en biotechnologies
Montréal

M. Michel Meunier

Professeur – Département de Génie physique et des matériaux
École polytechnique de Montréal
Montréal

M. Denis Poussart

Professeur
Département de génie électrique et informatique
Université Laval
Québec

Secrétaire du Comité
M. Daniel Lebeau
Professionnel de recherche
Conseil de la science et de la technologie

Annexe III

Les sigles employés dans l'avis

ADN	Acide DesoxyRibonucléique
AFM	Atomic Force Microscopy
AIST	Agency of Industrial Science and Technology
AMPEL	Advanced Materials and Process Engineering Laboratory
BMBF	Ministère fédéral allemand de l'Éducation, de la Science, de la Recherche et de la Technologie
CCMR	Cornell Center for Materials Research
CERION	Canadian-European Research Initiative on Nanostructures
CERPEMA	Centre de recherche sur les propriétés électroniques des matériaux avancés
CLT	Centre de liaison et de transfert
CNC	Cornell Nanofabrication Centre
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CNRS	Conseil national de la recherche scientifique
CNSI	California NanoSystems Institute
COPL	Centre d'optique, photonique et laser
CRSNG	Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DIMES	Institut de technologie de la microélectronique
ECAN	Energus Centre for Advanced Nanotechnology
EPL	Lithographie par projection de faisceau d'électrons
ETH	Institut fédéral suisse de technologie de Zurich
EUV	Extreme ultraviolet lithography
FCAR	Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche
FCI	Fondation canadienne pour l'innovation
FET	Field-effect Transistor
HP	Hewlett Packard
IMEC	International Microelectronic Center
IMI	Institut des matériaux industriels
IMP	Institut Max Planck
IMSI	Institut des matériaux et des systèmes intelligents
INO	Institut national d'optique
INRS	Institut national de la recherche scientifique
ISM	Institut des sciences des microstructures
ISSMRD	Institute of Solid State and Materials Research à Dresde
LFE	Lithographie par faisceau d'électrons
MEMS	Microelectromechanical Systems
METI	Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie
MFM	Magnetic Force Microscopy
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MITI	Ancienne appellation pour METI
MRSEC	Materials Research Science and Engineering Center
NC	Nanobiotechnology Center
NCCR	Nanoscale Science
NEOME	Network for Excellence on Organic Materials for Electronics

NFR	Natural Sciences Research Council
NIH	National Institute of Health
NIST	National Institute of Standard and Technology
NSF	National Science Foundation
NUTEK	National Board for Industrial and Technological Development
pib	Produit intérieur brut
R-D	Recherche et développement
RNA	Acide ribonucléique
RTD	Resonant Tunneling Devices
SNOM	Scanning Near-Field Optical Microscopy
SPM	Scanning Probe Microscopy
SSF	Swedish Foundation for Strategic Research
STM	Scanning Tunneling Microscopy
UCLA	Université de Californie à Los Angeles
UCSB	Université de Californie à Santa Barbara
UE	Union Européenne
VRQ	Valorisation-Recherche Québec
WTEC	World Technology Evaluation Centre

Annexe IV

Liste des tableaux

Tableau 1	Répartition des articles sur les nanotechnologies par pays, 1998 à 1996	6
Tableau 2	Applications futures des nanomatériaux	9
Tableau 3	Sources gouvernementales de financement de la recherche sur les nanotechnologies, 1997-2001, millions de dollars US ..	25
Tableau 4	Materials Research Science and Engineering Centers impliqués dans des recherches sur les nanotechnologies, 2000	26
Tableau 5	Centres universitaires de recherche en nanobiotechnologies, 2000	28
Tableau 6	Dépenses gouvernementales en recherche sur les nanotechnologies, 1997	32
Tableau 7	Comparaison des activités en sciences et technologie des nanostructures en Europe, au Japon et aux États-Unis	32
Tableau 8	Répartition des subventions et bourses accordées par le CRSNG, en nanotechnologies 1991-1992 à 1999-2000	45
Tableau 9	Subventions totales accordées aux universités canadiennes par le CRSNG pour des recherches en nanotechnologies de 1991-1992 à 1999-2000	46
Tableau 10	Financement gouvernemental des recherches sur les nanotechnologies	46

Annexe V

Liste des graphiques

Graphique 1	Nombre d'articles portant sur les nanotechnologies dans les revues scientifiques	5
Graphique 2	Nombre d'étudiants effectuant des études dans des disciplines scientifiques aux États-Unis, 1992-1999	29
Graphique 3	Subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies, 1991-1992 à 1999-2000, (000 \$)	44
Graphique 4	Pourcentage des subventions et bourses versées par le CRSNG pour des recherches sur les nanotechnologies par province, 1991-1992 à 1999-2000	44

