

NANOSCIENCES

*CHRISTIAN JOACHIM
LAURENCE PLÉVERT*

NANOSCIENCES

LA RÉVOLUTION INVISIBLE

OUVRAGE PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS
DU MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION
(CENTRE NATIONAL DU LIVRE ET CITÉ DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE)
DANS LE CADRE DU FONDS JULES VERNE

*ÉDITIONS DU SEUIL
27, rue Jacob, Paris VI^e*

ISBN 978-2-02-086703-0

© Éditions du Seuil, janvier 2008

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.seuil.com

Extrait de la publication

INTRODUCTION

Le merveilleux est de tous les infinis

Ce livre invite à plonger dans l'infiniment petit et, une fois arrivé «en bas», à jouer avec un seul atome ou une seule molécule. Notre expérience commune n'a jamais affaire à de tels objets à l'unité, car ils sont trop petits pour être saisis un par un. C'est grand comment, un atome ? Plutôt que de donner sa dimension – un dix-milliardième de mètre, soit un dix-millionième de millimètre –, on peut se demander quelle taille il aurait si j'avais, moi, lecteur de ce livre, la taille de la planète. Un atome, dès lors, serait une petite bille d'un millimètre. Et s'il était grand comme la pièce, alors moi, lecteur, je grandirais jusqu'à ce que ma tête touche le Soleil. Un atome ne peut donc être vu ni avec nos yeux, ni d'ailleurs avec nos microscopes optiques les plus puissants.

En 1981, un nouveau microscope, le microscope à effet tunnel, a été inventé, qui permet de former l'image d'un seul atome ou d'une seule molécule à la fois sur un écran d'ordinateur. Toutefois, les microscopes dits «électroniques» délivraient déjà des images d'atomes sur un écran phosphorescent dans les années 1950. En revanche, le microscope à effet tunnel est le premier instrument qui permette aussi de toucher,

avec sa petite pointe, un seul atome à la fois et de le déplacer à volonté. Habituellement, quand nous touchons quelque chose, les milliards d'atomes de nos doigts entrent en « contact » avec les milliards d'atomes de l'objet à toucher. Mais la pointe du microscope à effet tunnel est si effilée qu'elle permet véritablement de toucher un seul atome et même d'édifier, un atome après l'autre, des architectures atomiques inédites. Cette pointe devient le prolongement du doigt du scientifique ou de l'ingénieur.

Le microscope à effet tunnel est aussi en train de bouleverser notre rapport à la matière. Avec ce microscope devenu outil, une approche technologique différente est apparue, qui consiste à construire atome par atome des édifices de plus en plus grands, à les « monumentaliser » jusqu'à ce qu'ils incarnent chacun une machine minuscule capable de fonctionner comme une grande. C'est une approche ascendante de la construction d'un dispositif, qui prend à contre-pied la miniaturisation.

Imaginons par exemple que l'on veuille fabriquer un cube qui serait un million de fois plus petit qu'un grain de sable, c'est-à-dire qui mesurerait un nanomètre de côté, soit un milliardième de mètre. Pour construire ce nanocube, il faudra assembler un par un une soixantaine d'atomes. C'est possible grâce au microscope à effet tunnel, et l'on appelle « nanotechnologie » cette technologie ascendante de construction atome par atome. Dans l'approche descendante de la miniaturisation, il faudrait enlever 100 milliards de milliards d'atomes pour fabriquer le même nanocube à partir d'un cube d'un centimètre de côté.

Ainsi, par essence, la nanotechnologie est une technologie

qui préserve les ressources matérielles. Mais, au fil des années, la définition de la nanotechnologie est devenue plus élastique : la nanotechnologie s'est transformée en « nanotechnologies », qui ne concernent plus seulement la manipulation de la matière atome par atome, mais qui font référence à toutes les techniques permettant de fabriquer de « petits objets » avec une précision de l'ordre du nanomètre, quand bien même elles mettent en jeu des milliards d'atomes, et non plus quelques-uns.

Comment sommes-nous passés de la nanotechnologie vouée au développement durable aux nanotechnologies « fourre-tout » que nous connaissons aujourd'hui ? Cette dérive, que nous raconterons au premier chapitre, provient d'une incroyable opération politique où se mêlent batailles d'influence, argent et compétition. En quelques années, elle a détourné la nanotechnologie de son dessein initial. Les nanotechnologies d'aujourd'hui, qui utilisent les mêmes principes technologiques qu'avant l'invention du microscope à effet tunnel, poussent la miniaturisation à son extrême et flirtent avec l'échelle nanométrique. On leur doit d'extraordinaires dispositifs qui mesurent quelques dizaines de nanomètres de côté, c'est-à-dire qui comptent encore plusieurs milliers d'atomes. Nous décrirons ces petites merveilles au chapitre 2, qui retracera les épisodes marquants de l'aventure de la miniaturisation, souvent confondue, à tort, avec celle de la nanotechnologie.

Nous raconterons ensuite la véritable histoire de la nanotechnologie au chapitre 3. Les physiciens ont longtemps rêvé d'approcher un atome ou une molécule au plus près. Avec le microscope à effet tunnel, leur rêve est devenu réalité. Ils peuvent désormais accéder à une molécule et l'étudier comme

s'ils la touchaient du doigt. L'exploration de ce monde matériel d'en bas n'en est qu'à ses prémices. Les physiciens cherchent à savoir si les phénomènes observés à cette échelle obéissent aux lois que nous connaissons ou s'ils vont remettre en cause nos connaissances en physique.

Avec le microscope à effet tunnel, il est *a priori* possible de construire, atome par atome, tous les édifices moléculaires possibles et imaginables ! La synthèse de nouvelles molécules n'est certes pas inédite. Il s'en produit tous les jours des centaines dans les laboratoires, qui entrent dans la composition de colorants ou de médicaments... Mais ces nouvelles molécules sont fabriquées à des milliards et des milliards d'exemplaires à la fois (une seule goutte d'eau contient plus de 1 500 milliards de milliards de molécules !), tandis que la molécule fabriquée sous la pointe du microscope à effet tunnel constitue un exemplaire unique.

Équipés d'un microscope à effet tunnel, les physiciens et les chimistes n'allaient pas laisser passer l'occasion de concevoir de nouvelles molécules pour en faire les nanomachines les plus minuscules qui soient, des engins mécaniques ou des machines à calculer par exemple. Cette approche ascendante est prometteuse : le fonctionnement de surprenantes petites machines constituées d'une seule molécule a déjà été étudié, et nous verrons au chapitre 4 à quoi pourraient ressembler celles des générations suivantes.

Un jour, il sera sans doute possible de construire des édifices plus grands, par exemple des molécules du monde vivant, comme de l'ADN, des protéines et des membranes pour les y enfermer. Mais, une fois tout cet attirail moléculaire assemblé, que se passera-t-il ? La vie se trouve-t-elle

INTRODUCTION

au bout de la monumentalisation ? Le vivant exerce sur nous une fascination qui relève du sacré. Où se cache l'essence de la vie dans le monumental amas d'atomes que constitue une cellule ? On se demandera au chapitre 5 si le fantasme de recréer la vie *ex nihilo* a une quelconque chance de se concrétiser.

Les nanotechnologies soulèvent d'autres questions déconcertantes : les nanomachines pourraient-elles devenir autonomes et nous échapper ? Risqueraient-elles d'être toxiques ou de nuire à l'environnement ? Les nanotechnologies suscitent des débats passionnés, mais, au-delà, le progrès scientifique pose question, ballotté entre les avantages et les inconvénients de ses applications. Nous rendrons compte de ces débats et nous demanderons au chapitre 6 s'il faut avoir peur de l'exploitation de cet infiniment petit.

Ce livre se propose de décrire ce que sont réellement les nanotechnologies, et de réfléchir à leurs conséquences scientifiques et techniques. Pour cela, il faut retrouver cette envie de comprendre propre à l'esprit humain. Nous l'attachons plus communément aux étoiles, aux galaxies, à l'immensément grand. Mais le merveilleux est de tous les infinis.

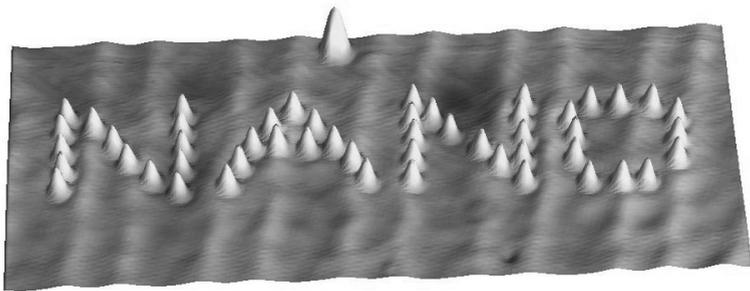


Image par microscopie à effet tunnel de 51 atomes d'or (plus un atome non identifié) déposés à la surface d'un cristal d'or. Les atomes apparaissent sur cette image comme des petites bosses d'une hauteur de 0,15 nanomètre (nm: milliardième de millimètre). Chacun des atomes d'or a été déplacé par la pointe du microscope pour écrire le mot «NANO». La précision du positionnement est de l'ordre de 0,05 nm et la plus petite distance entre deux atomes d'or dans les lettres est de 1,2 nm. Cette écriture atome par atome a été réalisée pour ce livre sur un microscope basse température de la compagnie Createc par Soe We-Hyo et Carlos Manzano, chercheurs dans le groupe «Atom Technology» de l'institut IMRE de l'agence A*STAR de Singapour, dirigé par l'auteur. Taille réelle de l'image : 10 nm × 30 nm.

1. Une affaire de détournement

Dans les années 1980, la nanotechnologie offrait du rêve à tous ceux qui se sentaient soucieux de l'avenir de la planète. Il devenait évident qu'il faudrait un jour réduire la quantité de matière et d'énergie consommée pour fabriquer toutes nos machines. Par exemple, de nos jours, la fabrication d'un micro-ordinateur nécessite 240 kilogrammes d'énergie fossile, 22 de produits chimiques et 1 500 litres d'eau. Celle d'une seule petite clé USB consomme 250 litres d'eau et de nombreux produits chimiques polluants¹.

La nanotechnologie, alors balbutiante, allait, espérons-nous, libérer l'industrie de l'utilisation massive de matériaux pour la faire entrer dans une ère de développement durable. Tel était mon projet, et celui d'autres chercheurs. J'avais à l'époque dressé un petit état de la planète qui me rappelle encore ce rêve de jeunesse. Je m'amusais à chercher de nouvelles technologies inoffensives pour l'environnement dans chaque filière industrielle. J'y notais, par exemple, les travaux

1. Ruediger Kuehr et Eric Williams, *Computers and the Environment. Understanding and Managing their Impacts* (rapport pour l'Unesco), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003.

de Kevin Ulmer, directeur de la recherche de la société Genex en Californie. Il envisageait de fabriquer des circuits électroniques ultraminiaturisés, à base de protéines produites par des bactéries programmées génétiquement. Avec lui, il s'en fallait de peu que les ordinateurs deviennent comestibles ! Les recherches du chimiste américain Ari Aviram, des laboratoires de recherche T. J. Watson d'IBM, près de New York, figuraient aussi en bonne place sur cette liste. Il proposait de réduire un composant électronique à une seule molécule. Il tentait de réaliser un interrupteur électrique avec une molécule qui pourrait bloquer le courant, ou encore de fabriquer un redresseur électrique moléculaire, c'est-à-dire de trouver une molécule qui ne laisserait passer le courant que dans un seul sens.

Dans la même veine, Forrest Carter, chimiste américain du NRL (Naval Research Laboratory), imaginait de diminuer la taille non seulement des composants, mais du circuit électronique entier limité à quelques molécules. Ces projets donnaient l'espoir de transformer la microélectronique en une « nanoélectronique » qui modérerait les effets environnementaux de l'industrie électronique.

Je n'étais pas le seul à rechercher des technologies alternatives plus respectueuses de l'environnement. Eric Drexler, jeune ingénieur du MIT (Massachusetts Institute of Technology), à Boston, avait imaginé au cours de sa thèse d'autres dispositifs que les composants et les circuits électroniques moléculaires. Dans son livre *Engines of Creation*¹, paru en

1. *Engins de création : l'avènement des nanotechnologies*, Paris, Vuibert, coll. «Machinations», 2005.

1986, il décrit des machines moléculaires d'un futur très lointain, capables de recycler des déchets, de produire de l'eau pure et de l'énergie. Ces machines, réduites à l'essentiel, c'est-à-dire à quelques molécules, feraient passer notre civilisation à la technologie moléculaire.

Mais ces beaux projets ont été aspirés par les nanotechnologies au sens large, celles issues des technologies classiques de microfabrication, et ont finalement tourné court. Aujourd'hui, les nanotechnologies ne sont pas associées à l'espoir d'une industrie plus économe des ressources de la planète, mais au contraire à des craintes : ne sont-elles pas toxiques ? Ne risquent-elles pas de nous échapper ? Nous reviendrons sur ces questions au chapitre 6. Comment en sommes-nous arrivés là ? Comment sommes-nous passés de ce beau dessein écologiste à cette défiance ? L'analyse de l'émergence de ce qu'il est maintenant convenu d'appeler la « bulle nano » apporte un éclairage sur ce basculement des valeurs associées aux nanotechnologies.

Récupération politique

Tout aurait dû bien se passer. Nous sommes au début de l'aventure de la nanotechnologie dans les années 1980. Quelques chercheurs, dont je fais partie, imaginent des molécules capables de remplir des fonctions électroniques et défrichent ainsi le champ de l'électronique moléculaire, emboîtant le pas à Ari Aviram. D'autres explorent ce fantastique outil qu'est le microscope à effet tunnel, inventé en 1981, capable de « voir » les atomes et les molécules et, surtout, de les mani-

puler un par un, comme cela a été découvert en 1989. Ils lancent les premières expériences menées directement sur une seule molécule. Toutefois, ces expériences ne font pas grand bruit et les milieux scientifiques se montrent souvent sceptiques sur les potentialités du microscope à effet tunnel, notamment en Europe. La nanotechnologie reste confidentielle. En 1995, seules cinq équipes maîtrisent la manipulation à l'échelle atomique, trois aux États-Unis, une en Europe et une au Japon. J'ai la chance, après avoir travaillé avec Ari Aviram, de faire partie d'une de ces équipes pionnières, celle de Jim Gimzewski du laboratoire IBM de Zurich, qui cherche à manipuler des molécules de plus en plus grandes avec un microscope à effet tunnel. Bien que nous soyons peu nombreux, nous progressons et découvrons, parfois un peu par hasard, de curieux phénomènes, que nous décrirons aux chapitres 3 et 4. La recherche aurait dû suivre ainsi son cours, mais il n'en fut rien.

Au lieu de cela, un autre processus s'est mis en place au milieu des années 1990. Il ne relevait plus de la recherche scientifique, mais de la politique. Tout est parti des États-Unis, où des groupes de pression ont convaincu le Congrès et l'administration Clinton de lancer un grand programme appelé NNI (National Nanotechnology Initiative, « Initiative nationale en nanotechnologie »). Décortiquons la genèse de ce programme pour comprendre quand et pourquoi la nanotechnologie a bifurqué, en s'écartant de son objet initial (la manipulation des atomes) et de son projet originel (l'éco-technologie) pour emprunter une voie toute différente dans la NNI, se transformer en « nanotechnologies » et se faire happer par la technosphère américaine, puis mondiale.

En juin 1992, l'écotechnologie a déjà le vent en poupe. Un sénateur du Tennessee, Albert Gore, revient du deuxième Sommet de la Terre qui s'est tenu à Rio de Janeiro, et sa fibre écologiste y a tant vibré qu'il organise une audition au Sénat des meilleurs spécialistes américains sur le thème des « nouvelles technologies pour un développement durable ». Parmi les personnes auditionnées se trouve Eric Drexler. Son livre suscite un formidable regain d'intérêt. En effet, à la date de sa parution, en 1986, la manipulation des atomes qui permettrait la réalisation de nano-ordinateurs et autres nanomachines n'était qu'une possibilité très hypothétique et contestée par de nombreux scientifiques. Mais, en 1989, le monde découvre que le microscope à effet tunnel peut déplacer les atomes à volonté. Voilà qui donne du crédit à Eric Drexler et à son ouvrage. Le 26 juin 1992, il est donc invité à s'exprimer devant la commission de sénateurs américains réunie par Al Gore. Son exposé est remarquablement sobre. Il déclare que le contrôle molécule par molécule de la construction d'une machine peut devenir une technologie plus propre et plus efficace que toutes les technologies connues. Il utilise habilement le nom de Richard Feynman, prix Nobel de physique, pour donner une forte caution scientifique à ce projet. Et, pour l'ancrer dans l'histoire, il exhume un discours prononcé en 1959 où l'illustre physicien évoque la fabrication à l'échelle nanométrique. Enfin, histoire de titiller l'orgueil national et de faire jouer la concurrence, il signale, fort à propos, que les Japonais ont dégagé d'importants financements pour la manipulation des atomes.

D'après les comptes rendus de cette audition, Al Gore se

rallie au projet décrit par Eric Drexler pendant la séance de questions. Alors qu'il n'avait que la miniaturisation de la microélectronique à l'esprit, il souscrit, en quelques minutes, à cette nanotechnologie capable d'élaborer des « molécule-machines » directement à partir d'atomes et de molécules. Suite à cet épisode, un groupe de pression se crée, œuvrant pour le développement durable des technologies, où Eric Drexler va jouer le rôle d'un Jules Verne moderne, excellent dans l'anticipation technologique. Il fondera sa société de prospective, le Foresight Institute, basé en Californie.

Pendant ce temps, comme Eric Drexler l'avait mentionné, le gouvernement japonais avait lancé un programme de recherche, pour accéder aussi à la manipulation des atomes et soutenir, au passage, l'avenir de son industrie microélectronique. Il s'agissait de ne pas se laisser distancer par les Américains ! Le résultat ne se fit pas attendre. Un chercheur japonais, Masakura Aono, travaillant au Riken, un laboratoire public de recherche, poursuivait des recherches sur la miniaturisation ultime des circuits électroniques et cherchait à réaliser des circuits à l'échelle atomique. Il parvint à développer une gravure atome par atome à la surface du silicium avec un microscope à effet tunnel. Les Japonais et les Américains étaient désormais au coude-à-coude.

Revenons à la politique. Bill Clinton, élu à la présidence en novembre 1992, confie la charge des nouvelles technologies à son vice-président, Al Gore. Les États-Unis ont alors à surmonter plusieurs défis. La fin de la guerre froide a modifié les priorités de la recherche américaine, qui doit s'adapter à la nouvelle compétition mondiale. Il ne s'agit plus seulement de soutenir la recherche militaire, mais de renforcer les

programmes de recherche-développement portant sur les biens de consommation civils. La très belle santé des industries électroniques japonaise et coréenne donne des sueurs froides aux industriels américains. Pour défendre la recherche américaine, il est indispensable de redoter les universités, dont les équipements sont souvent vieillissants. Al Gore est chargé de ce lourd chantier qui vise à réorganiser la recherche scientifique américaine, ni plus ni moins, et qui nécessite de l'argent, beaucoup d'argent. En s'inspirant du grand programme scientifique qu'avait commandé le président Roosevelt à la fin de la Seconde Guerre mondiale, il rend ses conclusions en août 1994, dans un rapport intitulé *Science in the National Interest*.

Al Gore y a-t-il défendu le projet d'écotechnologie qui l'avait tant enthousiasmé deux ans auparavant ? Hélas, nulle trace de développement durable dans ce rapport, ou si peu... L'intérêt initial du vice-président pour l'écologie s'est évanoui en route¹. Au lieu de soutenir la recherche sur les manipulations d'atomes et de molécules, susceptibles de promouvoir une industrie plus respectueuse de l'environnement dans le futur, le rapport proclame que les nanotechnologies sont stratégiques pour le développement industriel américain actuel ! Les nanotechnologies sont soudain devenues cruciales, non pour le développement durable de la planète, mais pour l'avenir immédiat de la microélectronique, de l'industrie chimique et de l'industrie pharmaceutique. Que s'est-il donc passé en quelques années ?

1. Son intérêt pour le développement durable redeviendra clair en 2006 avec la sortie du film *Une vérité qui dérange*, et lui vaudra le prix Nobel de la paix en 2007.

Devant l'importance de l'enjeu que représentait la réorganisation de la recherche américaine – et des fonds qui allaient de pair –, un lobby industriel est monté au créneau pour influencer sur le contenu du rapport. Le groupe de pression «pro-développement durable», qui gravitait autour d'Al Gore et où Eric Drexler tenait une position de choix, a dû céder devant ce concurrent. En deux ans, l'aura d'Eric Drexler a notablement pâli. Il s'est fait attaquer par un grand nombre de scientifiques, qui lui reprochaient – non sans raison – l'absence de base scientifique dans ses travaux. Certains journaux américains ont même commencé à le comparer à un gourou à la tête d'une secte, son Foresight Institute. Peu à peu, il a perdu son influence et sa crédibilité.

Le lobby industriel a trouvé son champion en la personne de Mihail Roco. Ancien professeur de mécanique, Mihail Roco a été nommé en 1990 à la tête de la division Ingénierie de l'Agence nationale de la science américaine (National Science Foundation, NSF). En 1995, il lance un programme de recherche sur les nanoparticules en inclusion dans les matériaux. Pour cela, il demande et obtient le feu vert du directeur de la NSF, Neal Lane, professeur à l'université Rice au Texas, qui va devenir le conseiller scientifique du président Bill Clinton en 1998. Mihail Roco est un universitaire raisonnable et tenace qui va, pendant cinq années, batailler pour structurer les nanotechnologies américaines. Pour lui, les projets d'usines moléculaires d'Eric Drexler sont des élucubrations et la nanotechnologie, au sens de technologie moléculaire, n'a pas d'avenir. Il fait partie de ceux qui sont persuadés que l'approche technologique descendante, c'est-à-dire la voie de la miniaturisation, est la seule valable.

Pour lui, les nanotechnologies englobent toutes les technologies de miniaturisation qui touchent de plus ou moins près à l'échelle du nanomètre.

Au début de l'année 1997, Tom Kalil, conseiller du président Clinton pour les questions économiques, contacte Mihail Roco. Il a lu le rapport d'Al Gore et veut évaluer les retombées économiques éventuelles des nanotechnologies. Avec l'aide de Tom Kalil, Mihail Roco met alors en place un groupe de travail qui, au bout de deux années d'efforts, débouchera sur la création de la NNI. Il leur aura fallu convaincre une douzaine d'agences chargées du financement des nanotechnologies aux États-Unis, rédiger un projet qui convienne à tous et surtout éviter les critiques des sénateurs qui voulaient voir financer d'autres programmes.

Certains se montraient en effet peu enthousiastes à l'idée d'ouvrir en grand le porte-monnaie du pays pour ces nanotechnologies, quand bien même on les supposait stratégiques. Pour persuader les sénateurs réticents et leur faire miroiter une technologie moléculaire radicalement différente de tout ce qui existait jusqu'à présent, Neal Lane a recours au livre d'Eric Drexler. Mais Mihail Roco veille encore à ce que les machines moléculaires à la Drexler disparaissent de la NNI. Le lobby industriel a bien fait son travail : à la suite d'une ultime réunion où sont présents Mihail Roco, Neal Lane et Tom Kalil, la NNI est lancée le 11 mars 1999.

Son budget initial est de 300 millions de dollars pour l'année 2000, mais certains sénateurs sont inquiets. Avec si peu d'argent, craignent-ils, les découvertes scientifiques américaines sur les nanotechnologies risquent d'être utilisées par le Japon et par l'Europe, qui pourraient développer de

nouvelles technologies plus rapidement que les États-Unis. Or la concurrence est sévère : pas question de se laisser doubler ! Finalement, le budget de la NNI s'élève au fil des années et atteint 970 millions de dollars en 2005. La NNI résistera aux changements politiques à Washington. La proposition budgétaire de 2008 faite par le président George W. Bush se monte ainsi à 1,447 milliard de dollars. Nul doute que l'abandon du thème du développement durable dans la NNI fut finalement une chance pour la sauvegarde du programme, au regard de l'intérêt que porte le président G. W. Bush à cette question...

La fin provisoire du développement durable industriel

Le 22 juin 1999, peu de temps après le lancement de la NNI, la Chambre des représentants s'intéresse à ses finances et organise une nouvelle audition, où intervient notamment Richard Smalley, professeur de chimie à l'université Rice au Texas. Auréolé du prestige du prix Nobel de chimie qu'il vient de recevoir en 1996 pour la découverte des fullerènes, il va prendre une place telle qu'un troisième groupe de pression se met en place autour de lui. Pour les besoins de la cause NNI, ce prix Nobel de chimie se transforme en prix Nobel de nanotechnologies et devient le fer de lance d'une partie de la communauté des chimistes. Il est habile. Dans toutes ses interventions auprès de la Chambre des représentants, entre juin 1999 et avril 2002, il prend soin de choisir des problèmes importants et bien connus du grand public, comme la lutte contre le cancer ou les ressources en énergie, pour les relier

La manufacture moléculaire de la vie	128
Les leçons de Dame Nature	132
6. Qui a peur des nanotechnologies?	135
OAM: des organismes atomiquement modifiés	136
Un autre danger annoncé: les nanomatériaux	139
Mouchards électroniques	144
Vers une nanomédecine?	149
Applications militaires en vue	152
Et ailleurs	153
À la recherche du bon sens	157
<i>Annexe I. Petite histoire de la microscopie</i>	159
La diffraction par rayons X	162
La phthalocyanine de cuivre en photo	163
Naissance de la microscopie électronique	166
Le microscope à effet tunnel	168
<i>Annexe II. Les tribulations d'un préfixe</i>	173
<i>Bibliographie</i>	181
<i>Remerciements</i>	185

