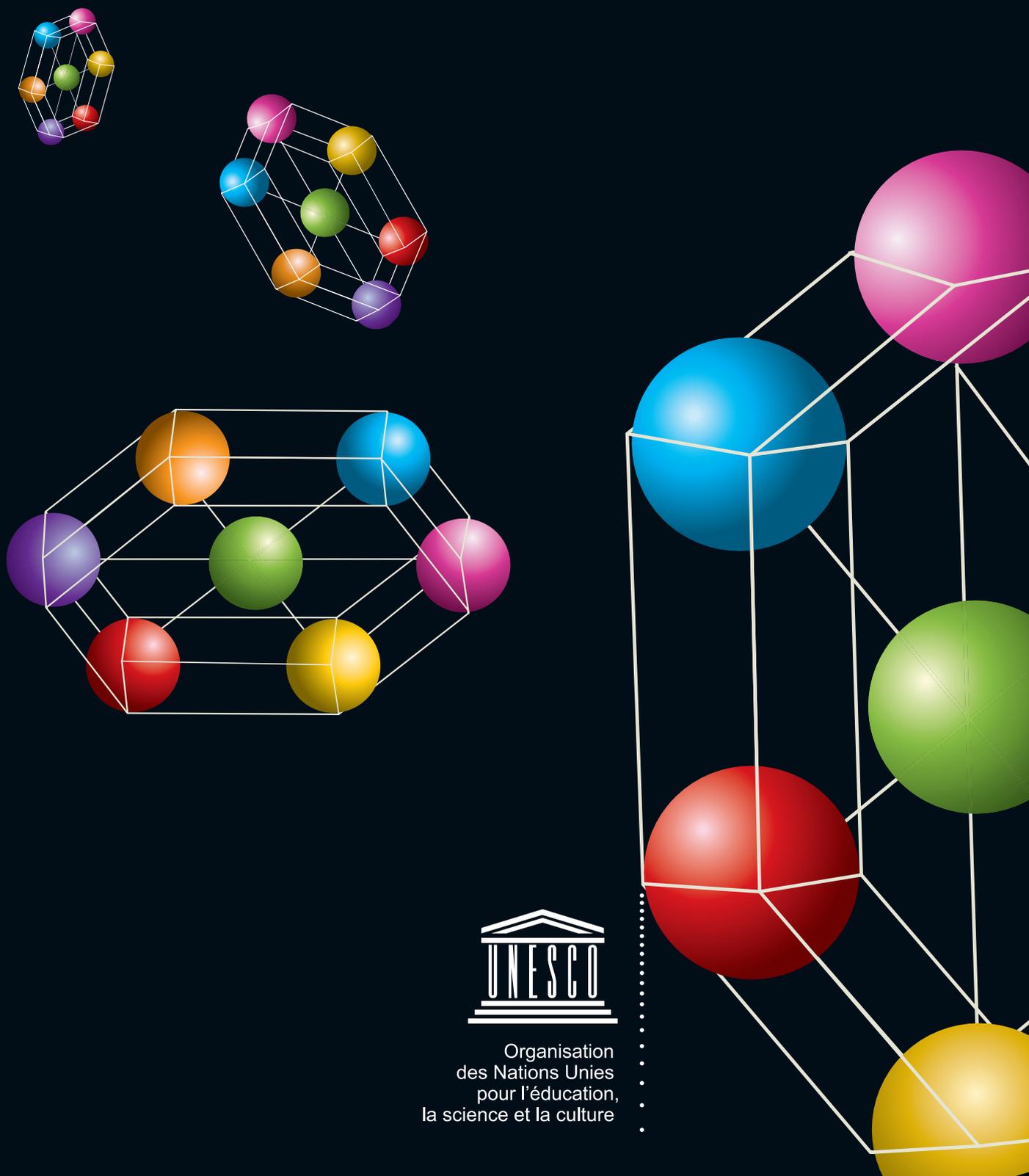


ÉTHIQUE ET POLITIQUE DES NANOTECHNOLOGIES



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Publié en 2007
par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
7, place de Fontenoy, 75352 PARIS 07 SP

Composé et imprimé dans les ateliers de l'UNESCO

Design graphique : Anna Mortreux

© UNESCO 2007
Printed in France

(SHS-2007/WS/01)



Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture

ÉTHIQUE ET POLITIQUE DES NANOTECHNOLOGIES

Table des matières

1	INTRODUCTION	3
1.1	L'UNESCO et les nanotechnologies	3
1.2	Définir les nanotechnologies	4
1.3	Historique	7
2	LE POINT SUR LA RECHERCHE EN NANOTECHNOLOGIE	13
3	IMPLICATIONS ÉTHIQUES, JURIDIQUES ET POLITIQUES DES NANOTECHNOLOGIES	17
3.1	Aspects internationaux des nanotechnologies	17
3.2	Toxicité et répercussions environnementales des nanotechnologies	19
3.3	Au-delà de l'évaluation des risques	22
3.4	L'éthique des sciences	22
3.5	Sources de confusion - des questions éthiques qui n'en sont pas	25
4	CONCLUSION	27
5	APPENDICE	29
	Liste de rapports sur les nanotechnologies	29

I

INTRODUCTION

Les nanotechnologies pourraient devenir la plus puissante force motrice des industries technologiques depuis l'avènement de l'Internet. Elles pourraient augmenter la vitesse des puces mémoires, éliminer les particules polluantes de l'eau et de l'air, détecter plus rapidement les cellules cancéreuses. Elles pourraient aussi échapper à notre contrôle et causer la fin de notre existence en tant qu'êtres humains. Les nanotechnologies pourraient atténuer la faim dans le monde, assainir l'environnement, guérir le cancer, permettre d'atteindre des âges bibliques, ou élaborer des super-armes d'une horreur indicible. Elles pourraient devenir le nouvel amiante. Les nanotechnologies pourraient stimuler le développement économique grâce aux retombées de la recherche. Elles pourraient également assombrir les perspectives offertes aux pauvres des pays en développement. Elles pourraient uniformiser la taille des molécules des crèmes glacées et permettre à un appareil photographique numérique de fonctionner dans le noir. Les nanotechnologies pourraient purifier les déchets toxiques à l'échelle des atomes. Elles pourraient transformer le monde en partant de l'infiniment petit. Elles pourraient aussi devenir un instrument du terrorisme. Les nanotechnologies pourraient conduire à la prochaine

révolution industrielle, transformer l'industrie alimentaire, réparer la couche d'ozone. Les nanotechnologies pourraient tout changer.

Ces affirmations, toutes authentiques, sont tirées de titres de la presse dont les premiers mots sont « Les nanotechnologies pourraient... ». Que sommes-nous supposés faire de ces arguments, incroyablement contradictoire, de promesses et de mises en garde ? Comment une chose, même si on fait la part de l'enthousiasme hyperbolique des experts en relations publiques et des journalistes, peut-elle recéler tant de possibilités ? En dépit de ces promesses échevelées, les nanotechnologies ont bien quelque chose de spécifique et quelques problèmes particuliers devraient retenir l'attention des citoyens, des hommes politiques, des scientifiques et des hommes d'affaires qui s'intéressent à ce domaine. Pour évaluer les aspects éthiques, juridiques et politiques des nanotechnologies, il est essentiel de distinguer leur potentiel maîtrisable de leurs possibilités impondérables. Le présent document décrit ce qu'est la science des nanotechnologies et présente certaines des questions éthiques, juridiques et politiques auxquelles la communauté internationale devra faire face dans le proche avenir.

I.I L'UNESCO ET LES NANOTECHNOLOGIES

Le progrès scientifique et technologique transforme profondément l'existence humaine. La technologie rend la vie plus sûre et moins pénible. La science médicale a grandement amélioré la santé des citoyens. Les technologies médicales ont contribué aux améliorations de la santé publique. Les technologies de l'information ont accru les possibilités et l'étendue de la communication entre les êtres humains. Les sciences écologiques ont élaboré des modes de production et de consommation plus durables. Les sciences de la vie inventent de nouveaux produits et de nouveaux médicaments. Les nanotechnologies recoupent tous ces domaines et soulèvent bon nombre de questions éthiques qui s'y posent déjà. Par exemple, la science peut bénéficier aux êtres humains, mais où vont actuellement les bénéfices ? La science et la technologie sont souvent vigoureusement développées

et encouragées dans les pays développés grâce à l'utilisation de ressources provenant de pays moins développés, mais leurs résultats et leurs produits ne retournent généralement pas vers ces derniers. La science et la technologie sont aussi devenues des activités fondamentalement internationales. La recherche médicale, par exemple, est réalisée aux quatre coins du monde, sous forme d'expériences menées à grande échelle dans de multiples centres. Des citoyens de pays en développement servent de cobayes pour des projets de recherche coordonnés dans des pays développés. Cependant, il est clair que les mêmes normes éthiques ne sont pas toujours appliquées dans tous les pays. Pour éviter les différences de conception touchant l'éthique de la science et de la technologie, il existe en la matière un besoin croissant d'action internationale.

De telles considérations ont incité les États membres de l'UNESCO à accorder une priorité à l'éthique dans le programme de travail de l'Organisation. Depuis les années 1970, l'UNESCO a, en diverses occasions, prêté attention aux dimensions éthiques des sciences de la vie et, en particulier, de la génétique. En 1993, les États membres ont créé le Comité international de bioéthique (CIB), qui réunit 36 experts de toutes les disciplines et de toutes les régions du monde et qui a pour mandat de formuler des recommandations sur des questions délicates de bioéthique. À la demande des États membres, il a contribué à la rédaction de normes susceptibles de constituer un socle de principes bioéthiques à l'usage de l'ensemble des pays. En 1997, la Conférence générale de l'UNESCO a adopté la *Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme*, puis, en 2003, la *Déclaration internationale sur les données génétiques humaines*. En raison de l'importance croissante de la bioéthique mondiale, les États membres de l'UNESCO ont récemment (octobre 2005) adopté la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme*. L'élaboration de normes ne sera pas par elle-même suffisante. Pour appliquer les normes et les faire opérer dans des contextes concrets, des activités de renforcement des capacités ont été lancées, comme, par exemple, la promotion de l'enseignement de l'éthique, la mise en place de comités d'éthique et l'échange d'expériences en matière d'éthique.

La sensibilisation croissante aux problèmes éthiques posés par la science et la technologie s'est également traduite en 1998 par la mise en place par les États membres de l'UNESCO de la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST). Cette commission internationale composée de 18 experts, conseille l'Organisation dans d'autres domaines de l'éthique appliquée, tels que l'éthique de la science, l'éthique

environnementale et l'éthique de la technologie. La COMEST a pour mandat spécifique (1) d'être un forum intellectuel d'échange d'idées et d'expériences, (2) de déceler, sur cette base, les signaux précurseurs de situations à risques, (3) de remplir, à ce titre, un rôle de conseil auprès des décideurs, (4) de favoriser le dialogue entre les communautés scientifiques, les décideurs et le grand public. Conformément à son mandat, la COMEST s'est penchée sur les technologies de l'information, l'utilisation de l'eau et les technologies hydrologiques, l'énergie et les technologies spatiales. Le CIB remplit des fonctions similaires en bioéthique. Il favorise la réflexion sur les enjeux éthiques et juridiques des recherches dans les sciences de la vie et de leurs applications, et encourage l'échange d'idées et d'information, notamment par l'éducation.

Le présent document a été rédigé en conformité avec le mandat éthique de l'UNESCO. Tout d'abord, les questions éthiques soulevées par les nanotechnologies devraient être recensées et analysées de façon à ce que le grand public, les groupes de spécialistes et les décideurs puissent prendre conscience des conséquences des nouvelles technologies. Les nanotechnologies se développant rapidement, il est nécessaire de retenir une approche anticipant les questions éthiques qui vont se poser. Plutôt que d'attendre que se manifeste l'inquiétude du public et qu'un débat moral s'engage, le CIB et la COMEST sont chargés d'évaluer en permanence les effets bénéfiques et dommageables éventuels des technologies nouvelles et émergentes comme les nanotechnologies. Telle peut être également la contribution de l'UNESCO : dans une perspective mondiale et à l'échelle internationale, promouvoir le dialogue entre toutes les parties prenantes et formuler des recommandations pour les décideurs qui auront à faire face aux questions morales soulevées par l'évolution et l'émergence de technologies nouvelles.

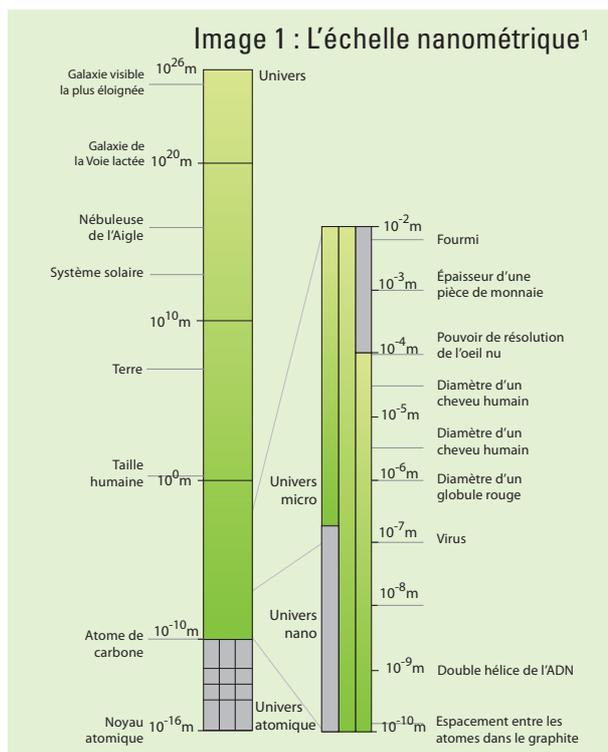
I.2 DÉFINIR LES NANOTECHNOLOGIES ?

Il existe à l'heure actuelle des dizaines de définitions différentes de ce que sont, ou de ce que pourraient être, les nanotechnologies, et il faut bien savoir qu'aucune d'entre elles n'a fait l'objet d'un accord. Les définitions comportent également un aspect politique et éthique - elles peuvent déterminer ce qui va attirer l'attention du public, l'inquiéter ou susciter son indifférence ou sa curiosité. La multiplicité des définitions indique bien que les nanotechnologies

(à l'instar d'autres sciences nouvelles telles que la biotechnologie) vont probablement brouiller la distinction classique entre recherche pure et recherche appliquée, ainsi qu'entre recherche publique et recherche financée par des fonds privés. Des contextes différents selon les disciplines et des établissements scientifiques nationaux divers amèneront des idées et préoccupations différentes à influencer sur le devenir des nanotechnologies.

Pour commencer, doit-on parler de nanosciences ou de nanotechnologies ? Tout au long du présent document, le terme « nanotechnologies » est utilisé pour désigner aussi bien la recherche scientifique fondamentale que la recherche appliquée. De nombreuses activités que l'on serait tenté de qualifier de « fondamentales » n'en font pas moins appel à des outils, des savoir-faire, des matériaux et des techniques qui, a priori, relèvent essentiellement de la technologie (ordinateurs, logiciels, microscopes complexes et appareils pour effectuer des mesures et des manipulations physiques et chimiques). De même, un grand nombre d'activités, que l'on pourrait ranger comme appartenant à l'ingénierie étant donné qu'elles impliquent la mise au point de dispositifs ou de machines, sont considérées aujourd'hui par les scientifiques comme « recherche fondamentale » en mécanique de la nature. De ce fait, dans le domaine des nanotechnologies, les sciences et les technologies sont étroitement liées et interdépendantes.

La distinction habituelle entre recherche « fondamentale » et recherche « appliquée » pose également des difficultés en matière de nanotechnologies puisqu'elles amènent à confondre la *recherche effective menée par les scientifiques et les ingénieurs* avec les retombées qu'en escomptent les observateurs, les promoteurs, les bailleurs de fonds et les scientifiques enthousiastes. On confond très souvent, lorsque l'on parle de nanotechnologies, leurs résultats - à savoir les bénéfices éventuels et les risques potentiels - avec l'état actuel des connaissances dans les laboratoires et les entreprises. Les retombées proposées de la science sont l'affaire des politiques sociales - elles font et devraient faire l'objet d'un débat entre les citoyens de tous les pays et non uniquement entre



les scientifiques ou les politiques. Ni inévitables ni déterminées par la recherche fondamentale, elles sont néanmoins limitées par celle-ci. Le devoir des scientifiques, en tant que citoyens, serait de remettre en question et de critiquer les retombées irréalistes ou dangereuses - et pas seulement d'en proposer de prometteuses. Les recherches en cours dans le domaine des nanotechnologies devraient être au cœur des politiques sociales, dans le cadre d'un système d'équilibre des pouvoirs, et non à la base de ces politiques.

Comment donc définir les nanotechnologies ? La définition la plus simple et la plus large consiste

Encadré 1

Selon la définition officielle donnée par la National Nanotechnology Initiative des États-Unis, les nanotechnologies concernent la recherche et la mise au point de technologies à l'échelle atomique, moléculaire et macromoléculaire, dans une fourchette comprise entre 1 et 100 nm environ, pour obtenir une connaissance fondamentale des phénomènes et des matériaux à l'échelle nanométrique ainsi que pour concevoir et mettre à profit des structures, des dispositifs et des systèmes ayant des propriétés et des fonctions nouvelles en raison de leur petite taille ou de leur taille moyenne.

Les différentes définitions proposées dans le monde varient selon les points forts de chaque pays. La Chine, le Japon et la République de Corée mettent l'accent sur les matériaux, et en particulier sur l'électronique, tandis que les chercheurs africains et latino-américains insistent souvent sur les matériaux dans le contexte de la médecine ou des sciences de l'environnement. La Royal Society (Royaume-Uni) opère une distinction entre « nanosciences » et « nanotechnologies », le premier terme comprenant l'« étude et la manipulation » des particules à l'échelle nanométrique et le deuxième recouvrant « la conception, la caractérisation et la production » de « structures, dispositifs et systèmes » à l'échelle nanométrique.

¹ Adapté de <http://invsee.asu.edu/nmodules/sizescalemod/unit3.htm>

peut-être à présenter les nanotechnologies comme l'ensemble des recherches menées à l'échelle nanométrique (10^{-9} m, soit un milliardième de mètre ; à titre de comparaison, un cheveu humain a un diamètre d'environ 20 000 nm). Quelle est la taille de l'échelle nanométrique (voir Figure 1) ? Les molécules, les virus et les atomes mesurent entre moins d'1 nm (atomes) et environ 100 nanomètres (grosses molécules telles que l'ADN). Ils sont trop petits pour être distingués à l'œil nu, ni même au microscope classique, qui utilise le rayonnement visible. D'où l'importance des nouvelles technologies de visualisation telles que le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique, non seulement pour voir mais également pour manipuler des choses à une échelle aussi petite.

Néanmoins, cette définition est manifestement trop large. Les chimistes, les physiciens et les biologistes travaillent sur des éléments à l'échelle nanométrique depuis au moins un siècle et débattent de leur structure, de leur composition, voire de leur existence depuis bien plus longtemps encore. La définition qu'utilise souvent la National Nanotechnology Initiative des États-Unis serait sans doute plus précise (Encadré 1). L'essentiel de ce que nous savons du comportement des atomes, des molécules et du monde physique repose sur des recherches effectuées à plus grande échelle (par exemple, sur la physique d'une balle de tennis ou la dureté du diamant). À l'échelle nanométrique, les propriétés observées peuvent cependant se révéler bien différentes. Ainsi une pépite d'or apparaît de couleur jaune à l'œil humain à la lumière naturelle, mais les nanoparticules d'or (celles qui flottent dans l'eau, par exemple) peuvent sembler rouges car elles ne réfléchissent que la lumière rouge du spectre ; de même, la conductivité du carbone sous forme de « nanotubes » est bien plus élevée que celle du carbone sous la forme d'un diamant en raison de sa structure différente à l'échelle moléculaire (nanométrique). Ces propriétés nouvelles, comme l'implique la définition, sont susceptibles d'être mises à profit pour de nouvelles applications - ce qui explique en grande partie l'enthousiasme suscité par les nanotechnologies. Le fait que l'or réfléchisse la lumière rouge à l'échelle nanométrique est mis à profit pour concevoir des systèmes expérimentaux capables de détruire des cellules cancéreuses en faisant appel au

rayonnement lumineux visible sans endommager les cellules saines.

Il existe des définitions encore plus spécifiques, en rapport avec la notion de contrôle à l'échelle nanométrique. Observer et comprendre les nouvelles propriétés des objets nanométriques n'est utile (du point de vue de l'ingénierie) que si ces éléments peuvent être manipulés et mis à profit pour créer de nouvelles combinaisons de molécules, de nouveaux appareils et dispositifs ou, dans le plus hypothétique des cas, des « usines » microscopiques. Cette conception des nanotechnologies porte souvent le nom de « fabrication moléculaire » et a souvent séduit les auteurs de science fiction au cours des vingt dernières années. Si l'on définit les nanotechnologies de cette manière, les *retombées proposées* sont considérablement plus restreintes - puisqu'il s'agit pour les ingénieurs et scientifiques d'imaginer des façons de créer toutes sortes de produits ou de matériaux « en partant de la base », c'est-à-dire atome par atome à l'aide d'usines nanométriques. Cette approche présenterait l'avantage d'une flexibilité quasi infinie, permettant de mettre au point toutes sortes de substances, d'objets, de dispositifs, d'appareils ou de matériaux en procédant atome par atome. L'autre approche, « descendante » - celle qui est utilisée à l'heure actuelle - utilise des substances naturelles ou fabriquées par l'homme qui sont ensuite assemblées ou construites selon un processus spécifique au produit. Aucun chercheur à ce jour n'a pu mettre au point de machines qui « partent de la base », et ils sont même peu à y travailler. Les débats sur la possibilité théorique d'un tel procédé de fabrication n'en ont pas moins bénéficié d'un vaste écho, en l'absence de tout travail expérimental significatif². La possibilité, et la menace, d'une fabrication moléculaire sont d'ordre secondaire par rapport aux autres problèmes à brève échéance abordés dans la troisième partie du présent document.

La définition présentant les nanotechnologies comme la fabrication de dispositifs nanométriques, et non plus comme la simple étude d'objets à l'échelle nanométrique, a conduit certains chercheurs à proposer encore une nouvelle définition - ou re-définition dans ce cas³. L'étude des « nanobiotechnologies » redéfinit les éléments nanométriques de la biologie et de la chimie

² L'exception à ce constat est la mise au point d'ordinateurs quantiques ou moléculaires, mais ces machines ne produisent rien et ne sont même pas encore considérées assez fiables ou robustes pour être d'une grande utilité dans la pratique. Elles montrent qu'on peut utiliser des objets nanométriques comme semi-conducteurs et transistors pour le calcul et le stockage de mémoire.

³ Whitesides, G. M., 2001, « The once and future nanomachine », *Scientific American*, Vol. 285, n° 3, septembre, p. 78-83.

(molécules), que l'on retrouve partout, comme de minuscules machines. On en est venu, par exemple, à parler de « nanomoteur » à propos de la molécule d'ATP, qui est une composante essentielle du cycle cellulaire de tous les êtres vivants. Il en va de même pour l'actine, qui forme le couple moléculaire actine/myosine responsable du stimulus électrique à l'origine du battement de cœur⁴. La redéfinition de la biologie et de la chimie comme nanobiotechnologies peut sembler n'être qu'une tentative mesquine pour ramener l'attention sur les sciences traditionnelles, mais il convient d'opérer ici la même distinction que celle évoquée plus haut : si ces minuscules moteurs ou machines biologiques sont mis à profit et manipulés pour faire des choses jusqu'alors inconnues ou inconcevables - si l'ADN est utilisé comme une pince et si la molécule de « prestine » sert à actionner un minuscule mécanisme - alors ce qui est crucial dans cette définition ce n'est pas simplement l'étude, mais bien l'exploitation des moteurs moléculaires, des molécules et des machines du vivant.

Enfin, il existe encore une autre définition des nanotechnologies, comme la « convergence des nanotechnologies, des biotechnologies, des technologies de l'information et des sciences cognitives (NBIC)⁵ », selon ce que propose la National Science Foundation. D'après cette définition, les nanotechnologies constituent une nouvelle forme de science à la croisée de la biologie, des technologies de l'information et des sciences cognitives à l'échelle nanométrique. C'est en quelque sorte la définition la plus radicale en ce qu'elle vise à rendre

compte de la manière dont les nanotechnologies seront utilisées pour « améliorer les performances humaines ». Étant donné qu'un grand nombre des questions soulevées par l'étude et l'exploitation des objets nanométriques requièrent des compétences poussées dans plusieurs domaines, il y a encore très peu de scientifiques ou de laboratoires capables de travailler à cette « convergence ».

Les définitions des nanotechnologies diffèrent selon les groupes, en fonction de ce qu'ils espèrent en tirer - que ce soit dans les domaines du corps humain et de la médecine, de l'environnement, des nouveaux matériaux ou des nouveaux objets biologiques. Ces définitions varient également en fonction des intérêts des pays et des acteurs sociaux qui s'intéressent aux nanotechnologies. Parce qu'il y a encore un abîme entre les retombées proposées et la recherche réellement menée, la définition des nanotechnologies reste très controversée - et il s'agit là d'un aspect important de la dimension éthique et politique des nanotechnologies. Pour l'UNESCO, même les pays qui ne mènent pas de manière active des recherches en nanotechnologies devraient néanmoins être associés à une définition des retombées proposées et de la recherche en cours qui se fonde sur des normes d'équité, de justice et d'impartialité. En l'absence d'une telle définition, les nanotechnologies seront définies par les entreprises et les pays qui défendent avec le plus de vigueur leurs propres intérêts. À ce stade précoce, les citoyens de chaque pays sont parties prenantes dans les efforts pour comprendre ce que vont devenir ou pourraient devenir les nanotechnologies.

1.3 HISTORIQUE

Comme leur définition, l'histoire des nanotechnologies peut être, et est, présentée de multiples points de vue, selon les origines dont on part et les étapes que l'on marque.

Peut-être le point de départ le plus souvent évoqué est-il la conférence de Richard Feynman intitulée « There's Plenty of Room at the Bottom »⁶, dans

laquelle ce célèbre physicien spéculait sur les possibilités qu'offrent la miniaturisation, l'ordinateur, les technologies de l'information et la physique pour explorer le monde infra-microscopique. Avec l'aplomb qui le caractérisait, Feynman présentait un ensemble de choses qui, selon lui, seraient facilement réalisables dans un avenir proche. Quarante ans après, nombre d'ingénieurs et de scientifiques

⁴ Goodsell, D. S., 2004, *Bionanotechnology: Lessons from Nature*, Hoboken, NJ, Wiley-Liss.

⁵ Roco, M. C. et Bainbridge, W. S., 2003, *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science*, Boston, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers.

⁶ Feynman, R. 1960. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*, Vol. 23, n° 5, février, p. 22-36.

continuent de s'enthousiasmer pour ces prédictions, même si aucune d'entre elles ne s'est encore réalisée. Il arrive aussi que l'on se réfère aux recherches menées à la même époque dans un domaine connexe par John Von Neumann sur la théorie générale et logique des automates ; ces travaux associaient eux aussi les connaissances de leur auteur en physique, ingénierie et technologie de l'information pour proposer de créer des machines autonomes - même si, dans ce cas, ce n'était pas à l'échelle nanométrique.⁷

Ni Feynman ni Von Neumann n'ont cependant examiné ces possibilités en recourant au concept de « nanotechnologies ». Ce terme a été vulgarisé dans un ouvrage de K. Eric Drexler, lui-même prophète inlassable des nanotechnologies, dans le livre d'anticipation *Engins de création*⁸. Drexler utilisait le mot pour décrire comment il voyait un monde où la fabrication moléculaire permettrait aux hommes de produire tout ce dont ils ont besoin - depuis les automobiles jusqu'au beefsteak - rien qu'en introduisant des déchets dans une boîte qui, à l'aide d'assembleurs nanométriques, les reconfigurerait en fonction des besoins (voir Figure 2). Le livre de Drexler est davantage considéré aujourd'hui comme une contre-utopie que comme une utopie, puisque l'auteur avertissait qu'à mesure que ces technologies se développeraient il faudrait bien veiller à éviter que ne soit libérées par accident des nanomachines autonomes et autoreproductrices qui, si elles échappaient à tout contrôle et se mettaient à consumer ou à transformer le monde naturel et artificiel, pourraient faire de la planète une masse de « gelée grise » inhabitable.

Drexler a beaucoup contribué au cours des années à susciter à la fois l'enthousiasme et la crainte face aux nanotechnologies. Il a fondé un institut consacré à l'étude des impacts scientifiques et sociaux potentiels des nanotechnologies (le Foresight Institute) et a écrit un ouvrage d'ingénierie théorique pour prouver que la fabrication moléculaire était

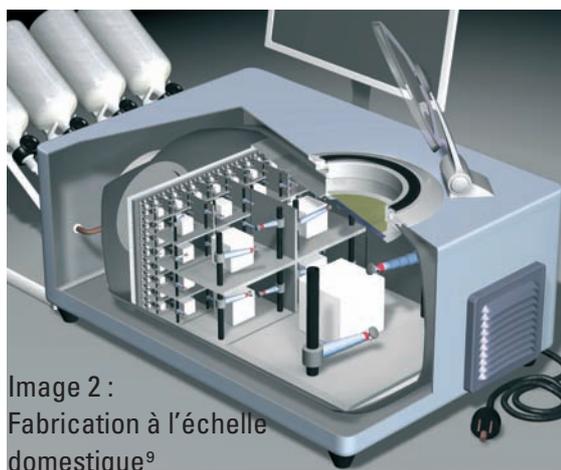


Image 2 :
Fabrication à l'échelle
domestique⁹

Prototype de petit appareil de fabrication moléculaire. Des machines minuscules assemblent les molécules en éléments de plus en plus gros, dans le cadre d'un processus d'assemblage convergent qui aboutit à des objets tels que les ordinateurs avec un milliard de processeurs. (Parties qui apparaissent ici sous forme de cubes blancs.)

possible¹⁰. À l'heure actuelle aucune démonstration expérimentale ou technique convaincante n'a toutefois été faite de la possibilité de la manipulation moléculaire même la plus simple et, de ce fait, l'idée que les nanotechnologies pouvaient servir à la fabrication moléculaire a engendré des réactions extrêmement hostiles, en partie suscitées par la diffusion de romans populaires qui, de l'avis de nombreux spécialistes et ingénieurs, sont impossibles à la fois scientifiquement et socialement. L'un des plus éminents scientifiques associés au développement des nanotechnologies, Richard Smalley (de l'Université Rice), a accusé Drexler de vouloir « faire peur aux enfants » et de répandre une vision de l'avenir fondée sur un raisonnement scientifique bancal¹¹. La marginalisation et le rejet du concept de fabrication moléculaire par la communauté scientifique a récemment amené Drexler à regretter d'avoir parlé de « gelée grise ».

⁷ Von Neumann et Burks, A.W., 1966. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press. Voir également la communication de Jean-Pierre Dupuy dans le récent rapport de l'Union européenne sur la santé et la protection des consommateurs figurant à la fin du présent document.

⁸ Drexler, K. E. 1986. *Engines of Creation*. Garden City, NY, Anchor Press/Doubleday., (version française : 2005 *Engins de création, l'avènement des nanotechnologies*, Paris, Vuibert.).

⁹ Crédit photographique : John Burch, Lizard Fire Studios, <http://www.lizardfire.com>

¹⁰ Drexler, K. E. 1992. *Nanosystems: Molecular machinery, manufacturing, and computation*. New York, Wiley.

¹¹ Voir leur débat public, passablement acrimonieux, de décembre 2003 dans *Chemical and Engineering News*, Vol. 81, n° 48, p. 37-42.

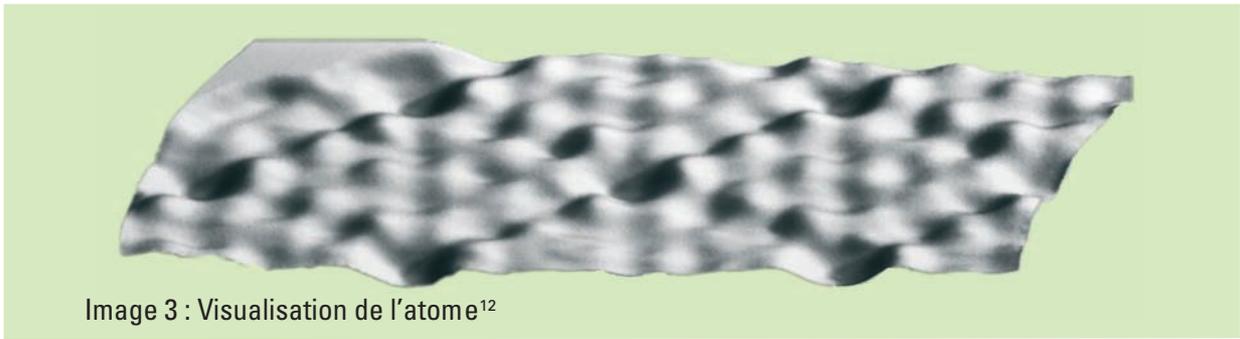


Image 3 : Visualisation de l'atome¹²

Ces quarante dernières années, de nombreux progrès décisifs réels en science et en ingénierie ont toutefois transformé des questions scientifiques anciennes en problèmes nanotechnologiques nouveaux. Il y a d'abord eu l'invention du microscope à effet tunnel et du microscope à force atomique, qui a permis aux scientifiques de visualiser et d'explorer les choses à une échelle encore jamais atteinte, pour finalement les sonder et procéder à des expériences sur elles. Entre la fin des années 1970 et 1983, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer ont mis au point le microscope moderne à effet tunnel, ce qui leur a valu en 1986 le Prix Nobel de physique, conjointement avec Ernst Ruska (pour ses travaux sur le premier microscope électronique). Les microscopes à effet tunnel s'appuient sur la propriété quantique étrange qu'est « l'effet tunnel » pour explorer et mesurer avec précision la configuration des électrons qui tournent autour des atomes. À partir de cette information, un ordinateur peut donner une représentation visuelle de l'atome (Figure 3).

Quelques années plus tard, Gerd Binnig participait également à l'invention du microscope à force atomique dans les laboratoires IBM de Zürich (Suisse). Ce microscope n'a été mis sur le marché à la disposition des scientifiques que depuis 1990 ; il fonctionne selon un principe très proche de celui du gramophone classique, avec un bras dont la pointe fine court sur une surface. À l'aide d'un laser, les variations nanométriques de la tête du bras qui monte et descend à mesure qu'il rencontre les atomes d'un échantillon peuvent être enregistrées et transformées en images numériques, comme avec le microscope à effet tunnel.

Ces outils ont permis aux ingénieurs et scientifiques de donner des images étonnantes de la configuration des atomes et molécules. Cependant, ce n'est

pas seulement la capacité de montrer les atomes qui fait l'intérêt de ces instruments mais la possibilité qu'ils offrent de manipuler réellement les atomes, de les déplacer ou de les disposer en configurations artificielles. Donald Eigler (IBM Research, Almaden, Californie) est un des virtuoses de l'utilisation de ces outils. En 1989, il a montré que l'on pouvait utiliser le microscope à effet tunnel pour écrire dans le vide avec plusieurs atomes de xénon les lettres « IBM ». Ensuite, Eigler et ses étudiants ont réussi, à l'aide du microscope à effet tunnel, à produire toutes sortes d'images fondées sur des manipulations d'atomes et de molécules, tels que « Corral quantique » (Figure 4), qui illustre la dualité ondes/particules des électrons à l'échelle atomique et permet de créer des portes logiques (telles que celles que l'on utilise dans les ordinateurs pour déterminer les fonctions logiques ET, OU et NON) en se servant d'atomes de monoxyde de carbone disposés précisément de façon à « tomber » comme des dominos en fonction de l'impulsion donnée à la porte.¹³

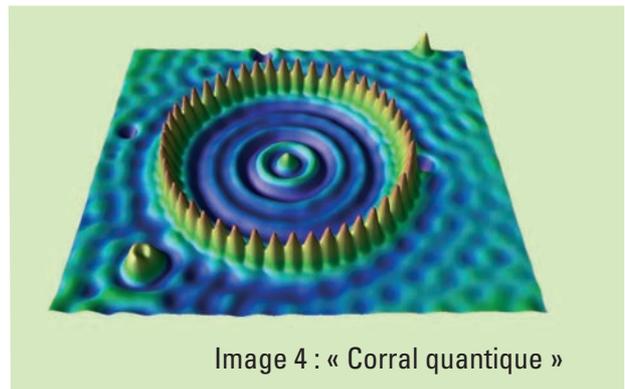


Image 4 : « Corral quantique »

Un autre progrès scientifique très important a contribué à alimenter l'enthousiasme pour les nanotechnologies ; ce fut la découverte des

¹² Figure reproduite avec l'aimable autorisation de Binnig, G. et Rohrer, H. 1987. Scanning tunneling microscopy: From birth to adolescence. *Review of Modern Physics*, Vol. 59, no 3, p. 622. Copyright 1987: American Physical Society.

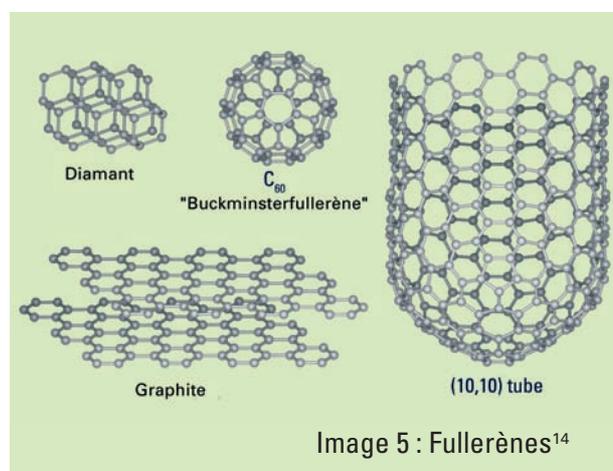
¹³ L'image du « corral quantique » est tirée de Eigler, D. M et Schweizer, E. K. 1990. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, Vol. 344, 5 avril, p. 524-526.

buckminsterfullerènes ou « buckyballs », molécules semblables à des ballons de football et composées de 60 atomes de carbone. Les buckyballs (C_{60}) ainsi que d'autres structures de carbone quasi sphériques telles que C_{70} et les dérivés substitués portent collectivement le nom de « fullerènes ».

Ces appellations viennent du nom du célèbre architecte futuriste Buckminster Fuller, dont les dômes géodésiques ont en commun avec la molécule la forme caractéristique d'un ballon de football. Les buckyballs sont, comme le diamant et le graphite, entièrement composés de carbone, mais leur forme et leur structure moléculaire leur donnent des propriétés spéciales. Lors d'une expérience de 1984, les professeurs Richard Smalley et Robert Curl, leurs étudiants Jim Heath et Sean O'Brien de l'Université Rice (États-Unis d'Amérique) et Harold Kroto de l'Université du Sussex (Royaume-Uni) ont pour la première fois identifié et décrit les buckminsterfullerènes. Ceux-ci ont d'abord été synthétisés à l'aide d'un appareil compliqué conçu pour vaporiser le graphite à travers une ouverture minuscule ; Curl les décrit comme formés de 60 atomes de carbone disposés alternativement en pentagones et hexagones. À l'époque, on ne parlait pas de nanotechnologies et ces travaux relevaient tout simplement de la chimie. La possibilité de synthétiser ces molécules attira vite l'attention sur elles puisqu'elles avaient d'importantes propriétés nouvelles susceptibles d'être exploitées. En 1996, Smalley, Curl et Kroto reçurent le Prix Nobel pour leurs travaux.

En 1991, S. Iijima, qui travaillait alors au Japon pour NEC, a découvert une autre variété de buckminsterfullerènes, les « nanotubes ». Ce sont des formes à un feuillet ou à plusieurs feuillets, la forme monofeuillet se présentant essentiellement comme un long cylindre de carbone avec une moitié de fullerène à chaque bout (Figure 5). Les nanotubes monofeuillets sont plus polyvalents que la forme du buckyball, et certains spécialistes estiment que c'est le matériau le plus solide en même temps que le plus souple jamais découvert. De plus, ils ont une conductivité électrique très élevée (qui en fait des rivaux du cuivre et de l'or, mais avec un fil beaucoup plus petit), ainsi qu'une haute conductivité thermique. Ces propriétés ont suscité une multitude de prédictions, de la plus terre-à-terre (on allait disposer d'un nouveau fil nanométrique pour conduire l'énergie

et l'information) jusqu'aux plus chimériques (on allait fabriquer un « ascenseur spatial », c'est-à-dire un long « câble » fin constitué de nanotubes qui permettrait de soulever un vaisseau dans l'espace au lieu d'avoir à le lancer avec une fusée).



Parmi les disciplines qui se sont précipitées dans les recherches nanotechnologiques, l'une des plus prometteuses a été la chimie des polymères qui, depuis plus de 60 ans, étudie les processus de fabrication de nouveaux matériaux, tant naturels que synthétiques. On a suggéré que les nanotubes de carbone, en particulier, permettraient de produire d'excellents matériaux pour des pièces comme les pare-chocs de voitures ou les ailes de chasseurs à réaction, mais la difficulté de les fabriquer en grandes quantités empêche actuellement de les expérimenter, de les distribuer ou de les promouvoir largement. L'un des premiers domaines où des investissements commerciaux ont été faits (avec ce que cela suppose de problèmes réglementaires et environnementaux éventuels à résoudre) a été la production à grande échelle de nanotubes monofeuillets à des fins expérimentales dans des universités et laboratoires d'entreprises. Au Japon, Mitsubishi, par exemple, a engagé de gros moyens pour produire des fullerènes en volumes plus importants¹⁵.

L'enthousiasme pour les buckyballs et les nanotubes a d'abord été le fait des chimistes, ingénieurs chimistes et physiciens. Mais les ingénieurs électroniciens, en particulier ceux qui travaillent sur les semi-conducteurs et sont spécialisés en microélectronique, n'ont pas tardé à s'approcher de l'échelle nanométrique dans leurs efforts pour

¹⁴ L'image de carbone est tirée de <http://cohesion.rice.edu/naturalsciences/smalley/emplibrary/allotropes.jpg>

¹⁵ Voir Tremblay, J. F. 2003. Fullerenes by the Ton: Mitsubishi's Frontier Carbon expects a big market for buckyballs. *Chemical and Engineering News*, Vol. 81, n° 32, p. 13-14.

miniaturiser les systèmes et composants électroniques. Apparu à la fin des années 1940, l'humble transistor a vu ses dimensions se réduire à tel point que les ingénieurs découvrent maintenant les « propriétés nouvelles » que les matériaux à l'échelle nanométrique commencent à révéler. À mesure que ces propriétés nouvelles apparaissent, il faut des matériaux et des configurations nouveaux pour des dispositifs plus petits, plus rapides et de plus faible puissance. Sans doute le plus petit des systèmes créés jusqu'à présent est-il le « quantum dot », conçu pour confiner une charge électrique unique susceptible d'être utilisée comme élément de base d'un ordinateur. Les « quantum dots » font l'objet de recherche et d'expériences depuis le début des années 1990 mais ils n'équipent pas encore les appareils informatiques commerciaux. Ils ont aussi des propriétés photophysiques originales, et des recherches sont en cours pour les utiliser en imagerie biomédicale.

En dehors de la chimie et de l'électronique, des disciplines comme la biologie moléculaire et le génie génétique ont acquis au cours des dix à quinze dernières années un grand savoir-faire en matière de manipulation des composants fondamentaux de la vie cellulaire à l'échelle nanométrique moléculaire. Les techniques et outils dont disposent les biochimistes et biologistes moléculaires, comme l'ADN recombinant et la PCR (Polymerase Chain Reaction) ont considérablement accéléré les types de manipulations et d'expériences qui peuvent être faites sur l'ADN, l'ARN et les protéines. Comme on l'a mentionné précédemment, certains de ces travaux semblent désormais de plus en plus relever des « nanotechnologies » du fait qu'ils visent à exploiter les propriétés d'organismes vivants ou de molécules associées à la vie organique. Depuis l'an 2000 envi-

ron, la nanobiotechnologie devient un champ de recherche à part entière.

Ce n'est qu'à partir de 1996 que le Gouvernement américain (suivi du Gouvernement japonais et des gouvernements européens) a sérieusement envisagé de financer les recherches en nanotechnologies proprement dites. En 2001, il a lancé la National Nanotechnology Initiative, programme interministériel conçu pour coordonner la recherche dans ce domaine entre les divers organismes publics de financement de la recherche-développement. La National Science Foundation américaine a joué un rôle de premier plan dans le financement des nanotechnologies, en particulier en créant des centres régionaux axés sur des aspects spécifiques de cette discipline. Ces centres (il y en avait 14 en 2005) sont eux-mêmes chargés de répartir les fonds entre les chercheurs et de coordonner les projets et objectifs dans leurs domaines propres.

Après cette forte impulsion initiale du financement de la recherche aux États-Unis, plusieurs autres pays ont commencé à financer sérieusement la recherche en nanotechnologies. Le Ministère japonais de l'éducation, de la culture, des sports, de la science et de la technologie a affecté quelque 250 millions de dollars à la recherche dans diverses branches des nanotechnologies. La Royal Society britannique signale que, au niveau de l'Union européenne, le montant total du financement est de l'ordre d'un milliard d'euros, le Royaume-Uni y consacrant pour sa part actuellement quelque 45 millions de livres chaque année. De surcroît, la Chine, la République islamique d'Iran, le Brésil et Israël ont tous bien fait savoir que les nanotechnologies figuraient parmi les priorités de la recherche nationale en science et technologie.

2

LE POINT SUR LA RECHERCHE EN NANOTECHNOLOGIE

L'éventail des projets de recherche en cours sur les nanotechnologies est immense. On peut dire sans risque, compte tenu des financements et de l'attention que cette recherche suscite, qu'il n'existe aucune discipline scientifique qui ne soit concernée. Des disciplines de base comme la physique, la chimie, le génie électrique, la biologie moléculaire et l'informatique sont celles qui se prêtent le mieux à des recherches - mais d'autres, comme la science des matériaux, le génie chimique, le génie environnemental, le génie biologique, la recherche médicale, l'optique et la photonique sont toutes des sources de connaissances qui contribuent au développement des nanotechnologies - et en particulier de leurs applications pratiques. En sciences sociales et en sciences humaines aussi on a enregistré une forte augmentation des propositions et des demandes de recherche, essentiellement dans les domaines de l'éthique et de l'analyse des politiques.

La recherche actuelle dans le domaine des nanotechnologies n'est pas, pour l'essentiel, motivée par une volonté de mettre au point des applications pratiques immédiates - elle est en grande partie à caractère exploratoire et expérimental, ou axée sur les types d'analyse et d'études approfondies qui sont à la base de toute discipline scientifique. Il ne manque pas de propositions d'utilisations futures possibles, mais les nanotechnologies se situent, en 2006, à un stade de transition - les spécialistes des disciplines traditionnelles reconnaissent qu'ils sont confrontés à un certain nombre de problèmes nouveaux qui empiètent sur des disciplines voisines, et par ailleurs, avec les nouveaux outils et techniques, apparaît une génération de scientifiques à même d'étudier et de comprendre des phénomènes

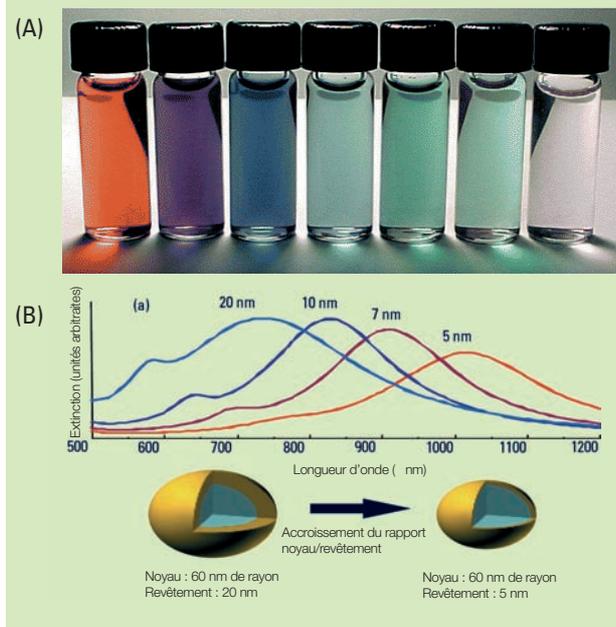
que leurs prédécesseurs n'avaient pas les moyens d'observer.

Pour ne prendre qu'un exemple des activités menées, considérons la tentative d'utiliser les nanotechnologies dans le traitement du cancer. Des chercheurs d'universités et de centres médicaux du monde entier utilisent des « nanobilles d'or » et la lumière visible pour tuer les cellules cancéreuses. Les « nanobilles » sont des petites perles de verre recouvertes d'une couche d'or dont l'épaisseur varie. L'absorption optique de l'or (la propriété qui le fait paraître jaune à la lumière du jour) peut être modifiée selon l'épaisseur de cette couche, de sorte que seules certaines longueurs d'onde sont absorbées et d'autres sont réfléchies. Les chercheurs greffent ensuite sur les nanoparticules des anticorps qui sont spécifiques des cellules cancéreuses, de sorte que, injectées dans un corps de souris, les nanoparticules ne se fixent que sur les cellules cancéreuses et non sur les cellules saines. Si le corps est ensuite soumis à un rayonnement de longueur d'onde appropriée (rayonnement ultraviolet émis par un laser de faible puissance), la température des nanobilles - et seulement celle des nanobilles - augmente, atteignant un niveau suffisant pour tuer les cellules cancéreuses environnantes (voir Figure 6).

Malgré ces utilisations aussi prometteuses que novatrices, la volonté des scientifiques universitaires et des ingénieurs de trouver des applications pratiques et de mettre en place des partenariats et une collaboration avec le secteur de l'industrie et les gouvernements reste extrêmement forte. La recherche actuelle sur les nanotechnologies s'oriente de ce fait nécessairement vers les applications commerciales et la consommation.

¹⁶ Illustration tirée de West, J. L. et Halas, N. J. 2003. Engineered nanomaterials for biophotonics applications: Improving sensing, imaging, and therapeutics. *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 5, p. 285-292.

Image 6 : Nanobilles¹⁶



Les « nanobilles d'or » sont des nanoparticules diélectriques composées d'un noyau entouré d'un fin revêtement métallique. En faisant varier les dimensions relatives du noyau et du revêtement, on peut concevoir des particules qui soit absorbent, soit dispersent la lumière dans le visible et une large part de la partie infrarouge du spectre électromagnétique. (A) Ces flacons contiennent soit une suspension colloïdale d'or (de couleur rouge caractéristique à l'extrême gauche) soit une suspension de nanoparticules recouvertes d'or dont les dimensions relatives du noyau et du revêtement varie. (B) Les propriétés optiques des nanobilles sont prédites par la théorie de diffraction de la lumière de Mie. Pour un noyau de dimension donnée, plus fine est l'épaisseur du revêtement, plus grande est la longueur d'onde à laquelle se produit la résonance optique.

Même si un petit nombre seulement de produits ont été élaborés à ce jour (voir l'encadré 2 établi à partir des palmarès Forbes 2003 et 2004 des dix premiers produits nanotechnologiques), il importe néanmoins de comprendre la signification de la « course à la commercialisation » à laquelle on assiste. En effet, si l'utilisation de nanomatériaux et les processus de production nanométrique atteignent rapidement une maturité commerciale, cette situation pourrait engendrer des problèmes éthiques et politiques nouveaux et en réactiver de plus anciens.

Encadré 2 Produits nanotechnologiques commercialisés récemment

- Fart à skis Nanowax Cerax
- Veste de ski imperméable Franz Ziener (traitement Nano-Tex)
- Vêtements infroissables et intachables par traitement Nano-Care
- Crème de soin pour la peau à taux de pénétration élevé L'Oréal
- Appareil photographique Kodak OLED (à diodes organiques luminescentes)
- Revêtement antiréfléchissant Nanofilm pour lunettes de soleil de haute protection
- Écran solaire Z-COTE
- Raquette de tennis à nanotubes Babolat
- Balles de tennis nanotech de InMat
- Semelles de production thermique Aerogel Shockjock
- Matelas lavable Simmons (traitement Nano-Tex)
- Clubs de golf Maruman & Co. utilisant des « fullerènes de titane »
- Balles de golf Nanodynamics
- « Soins de la peau personnalisés » Bionova
- Pansements Nucryst contre les brûlures, recouverts d'une couche de « nanoargent »
- Désinfectant (nanoémulsion) de qualité militaire EcoTrue de chez Envirosystems
- Aérosol superhydrophobe Mincor de chez BASF destiné à rendre imperméables les matériaux de construction
- Aérosol pour fenêtres ClarityDefender de chez Nanofilm
- Crème contre les douleurs articulaires et musculaires Flex Power (utilisant des « liposomes de 90 nm »)
- Adhésif dentaire (nanohydroxyapatite) de 3M

Nombreuses sont les entreprises qui se préoccupent de l'accueil que réservera le public à de nouveaux produits ainsi que de sa compréhension et de sa perception des nanotechnologies. Leurs raisons sont, certes, intéressées - ces entreprises souhaitent élaborer des produits qui seront bien accueillis - mais elles sont aussi inspirées par les réactions hostiles récemment suscitées par les aliments et les organismes génétiquement modifiés (GM/OGM). Étant donné le statut actuel de la science - avec le développement de l'énergie nucléaire, les accidents

de Tchernobyl et de Bhopal, le débat sur les aliments génétiquement modifiés et l'ESB au Royaume-Uni et en Europe et l'augmentation considérable des actions en responsabilité civile aux États-Unis - les spécialistes des nanotechnologies sont parfaitement conscients de la nécessité d'étudier tant les utilisations que les effets dommageables potentiels des produits nanotechnologiques bien avant qu'ils ne soient commercialisés. Cette prise de conscience et la tendance des entreprises à recourir au principe de précaution dans la recherche, sont chose nouvelle.

Les conséquences de cette situation à l'échelon international sont évidentes - comme dans le cas des aliments génétiquement modifiés, le manque de connaissances sur les effets des nanotechnologies du point de vue de la santé et de la sécurité peuvent se traduire par des restrictions, des interdictions totales et des conflits internationaux complexes touchant la production et le transport des produits nanotechnologiques. En dehors des demandes émanant d'organisations non gouvernementales, de la société civile et d'obser-

vateurs internationaux concernant la réalisation de recherches plus approfondies, beaucoup d'entreprises estiment nécessaire d'accroître les recherches dans les domaines de la sécurité, de la toxicité, de la santé et de l'environnement et, dans une certaine mesure, l'étude des questions éthiques et politiques liées à la production des nanotechnologies. L'adoption de normes volontaires, l'élaboration de normes internationales et la définition des bonnes pratiques internationales en ce qui concerne la conception et la production de nanomatériaux sont autant de sujets de préoccupation pour les entreprises - mais le cadre institutionnel et organisationnel qui permettrait d'y faire face en conciliant des intérêts divergents est à ce stade insuffisant. On peut, à l'évidence, confier à l'UNESCO et à ses États membres la tâche de le développer, en facilitant la définition de normes obligatoires et facultatives concernant la production commerciale et en encourageant la promulgation de normes éthiques applicables aux recherches universitaires à caractère aussi bien commercial que traditionnel.

3

IMPLICATIONS ÉTHIQUES, JURIDIQUES ET POLITIQUES DES NANOTECHNOLOGIES

De même que les nanotechnologies recouvrent une grande variété de spécialités scientifiques et techniques, de même leurs implications éthiques, politiques et juridiques relèvent de nombreuses disciplines. Dans un certain nombre de domaines, les nanotechnologies rejoindront des questions de politique générale qui se posent déjà, ou feront resurgir de vieilles alternatives d'ordre éthique - mais dans d'autres, elles en poseront de nouvelles.

3.1 ASPECTS INTERNATIONAUX DES NANOTECHNOLOGIES

La recherche en matière de nanotechnologies est actuellement le fait des pays développés comme des pays en développement du monde entier, mais le niveau de financement et d'investissement, l'accès aux infrastructures et aux équipements scientifiques et techniques ainsi que la coopération intersectorielle varient beaucoup entre ces pays. Comme ce fut le cas pour les précédentes avancées scientifiques et technologiques, les pays en développement risquent d'être tenus à l'écart par une « fracture du savoir » s'ils ne parviennent pas à trouver des moyens de participer à la recherche sur un pied d'égalité avec les autres nations. Cependant, de plus en plus d'éléments indiquent que la nature de cette fracture revêtira de nos jours un aspect différent de celui qu'elle aurait pu avoir il y a 15 ans. Avec l'Internet, les chercheurs ont bien plus de chances d'avoir accès facilement à des publications, et l'évolution de la situation économique de la Chine, du Brésil et de l'Inde a pour conséquence que les chercheurs des États-Unis ou de l'Union européenne sont bien plus susceptibles de se rendre dans ces pays, d'entretenir des relations avec leurs chercheurs et de mettre en place des collaborations avec eux. Par conséquent, les nanotechnologies ont des chances de représenter un projet scientifique beaucoup plus international que ne l'était, par exemple, la recherche en biotech-

nologie des années 1980 et 1990. Certes, différents intérêts nationaux peuvent entrer en conflit, mais il est clair que la « fracture du savoir » ne prendra pas la forme qu'elle avait jusqu'alors.

Il est tout à fait possible que les inégalités en termes d'accès à la recherche soient plus grandes au sein des pays qu'entre les pays. Entre les experts et les élites de différents États, aux plus hauts niveaux de la recherche-développement, la communication est devenue plus facile et plus répandue, mais elle est de moins en moins courante entre les experts et élites d'un même pays et les classes les plus défavorisées et les moins éduquées, les mesures encourageant cette communication étant en outre en perte de vitesse. Il faut donc que les scientifiques et les experts de la communauté internationale trouvent des moyens de réduire la « fracture du savoir » non seulement entre les nations mais aussi au sein de leur propre pays.

La question du décalage entre les pays en matière de connaissances soulève celle de la mesure dans laquelle la recherche en nanotechnologies, selon ses champs d'applications et son orientation, profitera équitablement à toutes les nations. Comme un article de *PloS Medicine*¹⁷ le soulignait en 2005, il y a des domaines où la recherche pourrait apporter

¹⁷ Salamanca-Buentello, F., Persad, D. L., Court, E. B., Martín, D. K., Daar, A. S. et Singer, P. A. 2005. Nanotechnology and the developing world. *PloS Medicine*, Vol. 2, n° 5, e97, p. 302.

bien plus aux pays pauvres qu'aucun développement commercial ne le pourra jamais - il s'agit de domaines comme le stockage et la conversion d'énergie, le traitement de l'eau, ainsi que le traitement et le diagnostic des maladies. L'article va jusqu'à suggérer que, pour les pays en développement, les 10 applications principales des nanotechnologies pourraient également contribuer à la réalisation des « Objectifs du Millénaire pour le développement » de l'ONU (voir illustration 7).

Cependant, par quels mécanismes faut-il favoriser cette recherche ? Comment les scientifiques, dans les universités et les entreprises, peuvent-ils être

encouragés (au-delà des simples considérations de viabilité commerciale) à poursuivre ces objectifs ? La coopération internationale peut contribuer à orienter les travaux des scientifiques des universités et des entreprises vers la recherche dans les domaines où elle est le plus nécessaire et où elle aura le plus d'impact. Bon nombre de ces domaines jouissent d'un fort potentiel commercial et de développement, mais à condition de bénéficier de l'engagement des États et des acteurs privés - dans un premier temps pour encourager cette recherche et, dans un second temps, pour l'appliquer au sein des différentes infrastructures des pays en développement.

Image 7 : Les 10 applications principales des nanotechnologies et les Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) des Nations Unies

Rang (score)	Applications des nanotechnologies	Exemples	OMD correspondants
1 (766)*	Stockage, production et conversion d'énergie	Systèmes innovants de stockage de l'hydrogène fonctionnant grâce à des nanotubes de carbone et autres nanomatériaux légers Cellules photovoltaïques et dispositifs d'éclairage organiques utilisant les « quantum dots » Nanotubes de carbone dans les revêtements composites des piles solaires Nanocatalyseurs pour la production d'hydrogène Membranes biomimétiques hybrides protéine/polymère	VII
2 (706)	Amélioration de la productivité en agriculture	Zéolites nanoporeuses pour la libération retardée et le dosage efficace de l'eau et des engrais pour les plantes, et des nutriments et médicaments pour le bétail Nanocapsules pour la diffusion d'herbicides Nanocapteurs pour la surveillance de la qualité du sol et de la santé des végétaux Nano-aimants pour la décontamination du sol	I, IV, V, VII
3 (682)	Traitement et assainissement de l'eau	Nanomembranes pour la purification, le dessalement et la désinfection de l'eau Nanocapteurs pour la détection d'agents contaminants et pathogènes Zéolites nanoporeuses, polymères nanoporeux et argiles attapulgites pour la purification de l'eau Nanoparticules magnétiques pour le traitement et l'assainissement de l'eau Nanoparticules de TiO ₂ pour la dégradation catalytique des polluants de l'eau	I, IV, V, VII
4 (606)	Diagnostic et dépistage des maladies	Systèmes microgoutte de l'ordre du nanolitre (laboratoires sur puce) Séries de nanocapteurs fabriquées à partir de nanotubes de carbone « Quantum dots » pour le diagnostic de maladies Nanoparticules magnétiques utilisées comme nanocapteurs Conjugués anticorps/dendrimère pour le diagnostic du VIH-1 et du cancer Nanocapteurs sous forme de nanofils et nanocourroies pour le diagnostic de maladies Nanoparticules utilisées comme rehausseur d'image en imagerie médicale	IV, V, VI
5 (558)	Systèmes d'administration de médicaments	Nanocapsules, liposomes, dendrimères, buckyballs, nanobioaimants et argiles à attapulgite pour systèmes d'administration lente et continue de médicaments	IV, V, VI
6 (472)	Transformation et stockage des produits alimentaires	Nanocomposites pour la mise sous film plastique dans l'industrie alimentaire Nano-émulsions antimicrobiennes appliquées à la décontamination de matériel agroalimentaire d'emballages ou d'aliments Biocapteurs nanotechnologiques détecteurs d'antigènes pour la mise en évidence des contaminations pathogènes	I, IV, V
7 (410)	Lutte contre la pollution atmosphérique et assainissement de l'air	Dégradation photocatalytique des polluants atmosphériques par l'utilisation de nanoparticules de TiO ₂ dans les systèmes autonettoyants Nanocatalyseurs pour rendre les pots catalytiques plus efficaces, plus économiques et mieux contrôlables Nanocapteurs pour la détection de substances toxiques et de fuites Nanodispositifs de séparation des gaz	IV, V, VII
8 (366)	Construction	Structures nanomoléculaires permettant de rendre l'asphalte et le béton plus résistants aux suintements d'eau Nanomatériaux thermorésistants pour arrêter les ultraviolets et le rayonnement infrarouge Nanomatériaux pour rendre les logements, surfaces, revêtements, colles et bétons plus économiques et durables, et pour protéger de la chaleur et de la lumière Surfaces autonettoyantes (par exemple vitres, miroirs, toilettes) dotées de revêtements bioactifs	VII
9 (321)	Surveillance médicale	Nanotubes et nanoparticules pour équiper les capteurs de glucose, de CO ₂ et de cholestérol et permettre la surveillance de l'homéostasie in situ	IV, V, VI
10 (258)	Repérage et destruction des vecteurs biologiques et des parasites	Nanocapteurs pour la détection des parasites Nanoparticules entrant dans la composition de nouveaux pesticides, insecticides et insectifuges	IV, V, VI

* Le score maximum qu'une application pouvait recevoir était 819. DOI : 10.1371/journal.pmed.0020097.t001

3.2 TOXICITÉ ET RÉPERCUSSIONS ENVIRONNEMENTALES DES NANOTECHNOLOGIES

La toxicité des produits et les risques pour les personnes et l'environnement sont les problèmes à court terme les plus urgents que posent les nanotechnologies. Il s'agit plutôt de problèmes de sécurité et de santé que de questions d'ordre éthique ou politique, mais, parce que les nanotechnologies sont perçues comme une nouveauté, les nouvelles formes de danger ou de risques qu'elles peuvent faire courir inquiètent davantage et l'on s'interroge par conséquent sur la manière d'y faire face. Pour traiter ce problème, la plupart des entreprises et de nombreux chercheurs pratiquent la « gestion des risques », forme d'évaluation extrêmement technique qui a nécessairement un champ d'application réduit. Cette méthode a l'avantage de définir précisément les risques (et parfois les effets bénéfiques) des substances, matériaux et dispositifs récemment créés, mais ne s'intéresse à aucune des questions plus vastes relatives à l'importance éthique ou politique de ces risques, par exemple celle de savoir qui va les assumer, quelle sera leur répartition au plan international, et qui sera habilité à prendre des décisions reposant sur les analyses effectuées.

À ce jour, peu d'études ont été faites sur ces risques. Plusieurs rapports récents (énumérés à la fin du présent document) donnent davantage de détails sur l'état actuel de la recherche. Il existe deux sujets d'inquiétude : la dangerosité des nanoparticules et le risque de contamination. La première concerne les effets biologiques et chimiques des nanoparticules sur le corps humain ou sur les écosystèmes naturels ; le second pose la question des fuites, des rejets, de la circulation et du taux de concentration de nanoparticules qui représenteraient un danger pour les organismes ou les écosystèmes.

Seules quelques substances nouvelles définies comme des « nanoparticules » ont des chances de

connaître une large diffusion dans un proche avenir. Les plus probables sont des nanostructures à base de carbone comme les fullerènes et les nanotubes en carbone à un feuillet ou à plusieurs feuillets. D'autres, comme le dioxyde de titane, l'oxyde de zinc ou les nanobilles d'or seront probablement (ou sont déjà) utilisées dans divers contextes. Le mieux est de les classer en trois catégories : les nanoparticules « d'ingénierie » (comme les fullerènes et les nanobilles d'or), les nanoparticules « accidentelles » (comme celles que l'on trouve dans les fumées de soudure, de cuisine et de diesel) et les nanoparticules « d'origine naturelle » (embruns océaniques salés ou combustion lors de feux de forêt). Seules les nanoparticules « d'ingénierie » constituent une classe de particules totalement nouvelle et, à ce jour, seuls les fullerènes ont été sérieusement étudiés, tandis que les nanoparticules « accidentelles » (souvent appelées « particules ultrafines ») comme les gaz d'échappement des automobiles, ont manifestement fait l'objet d'études beaucoup plus approfondies. Les quelques études réalisées jusqu'à présent sur la toxicité des fullerènes semblent indiquer qu'ils sont effectivement dangereux - mais aussi qu'il est possible de les rendre moins dangereux, notamment par adjonction d'autres produits chimiques à leur surface en cours de fabrication, ce qui modifie leurs propriétés chimiques¹⁸. Les conclusions de ces études laissent à penser que la bonne question qu'autorités réglementaires et décideurs doivent se poser au sujet des nanotechnologies n'est pas « sont-elles sûres ? » mais « comment peut-on les rendre plus sûres ? ». La coopération et la coordination internationales peuvent contribuer à la définition de normes d'éthique minimales pour la création de substances de ce type et les essais dont elles font l'objet : les scientifiques devraient être tenus non seulement d'annoncer la découverte ou la création de telles nanoparticules, mais aussi

¹⁸ Plusieurs études sur la toxicité des fullerènes ont été faites. L'une d'entre elles a montré les dégâts d'oxydation subis par le cerveau du bar à grande bouche (Oberdörster, E. 2004. Manufactured nanomaterials [fullerenes, C₆₀] induce oxidative stress in brain of juvenile largemouth bass. *Environmental HEALTH Perspectives*, vol. 112, n° 10, p. 1058 à 1062), tandis qu'une autre mesurait la cytotoxicité des buckyballs chez le rat (Colvin, V. L. 2003. The potential environmental impact of engineered nanomaterials. *Nature Biotechnology*, vol. 21, n° 10, p. 1166 à 1170).

d'indiquer les conditions nécessaires pour les rendre sûres ou plus sûres que d'autres matériaux utilisés aux mêmes fins.

Les répercussions environnementales et écologiques des nanotechnologies peuvent aussi être extrêmement difficiles à évaluer. En raison de la complexité naturelle des cycles écologiques et de l'impossibilité de procéder directement à des expériences sur l'environnement naturel, les dangers et risques de contamination d'un écosystème par les nanoparticules sont très peu connus. Dans de nombreux autres cas, toutefois, la question la plus urgente n'est peut-être pas de déterminer la toxicité exacte des nanoparticules, mais de créer une nouvelle réglementation et d'appliquer les anciennes réglementations aux industries qui créent et traitent ces nouveaux matériaux. Dans beaucoup de pays, certains des produits chimiques parmi les plus manifestement dangereux, comme l'arsenic et le mercure, font l'objet de contrôles insuffisants et s'il s'avère que les nanoparticules sont moins toxiques qu'eux, c'est une rude tâche qui attend les responsables de la réglementation. Les entreprises qui pratiquent la chimie verte et mettent au point des procédés de recyclage et de réutilisation des déchets entraîneront naturellement moins de risques de contamination que celles qui ne le font pas ; mais instaurer des incitations en faveur de pratiques plus coûteuses est un problème politique beaucoup plus ancien que les nanotechnologies.

L'Union européenne, comme les États-Unis, disposent de systèmes de réglementation qui pourraient permettre d'évaluer les dangers et risques de contamination des nanotechnologies. La Direction générale « Santé et protection des consommateurs » de la Commission européenne a d'ores et déjà publié un rapport préliminaire sur un procédé qui permettrait de faire face à ces risques. De plus, la nouvelle réglementation sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques (REACH) de l'Union européenne aura des effets considérables sur l'industrie chimique et des conséquences inconnues pour les producteurs de nanoparticules.¹⁹

Aux États-Unis, l'Environmental Protection Agency (US EPA), la Food and Drug Administration, l'Occupational Safety and Health Administration et le National Institute of Occupational Safety and Health ont également commencé à étudier les

modifications à apporter aux processus en vigueur pour prendre en compte les nanotechnologies. L'US EPA est notamment en train d'évaluer son premier « préavis de fabrication », présenté par une société sollicitant l'approbation réglementaire pour des nanotubes de carbone. En dehors de leur mandat d'organisme de surveillance, plusieurs de ces institutions financent aussi des projets de recherche interne ou externe visant à comprendre les dangers et les risques de contamination découlant des nanomatériaux « d'ingénierie ».

Au Royaume-Uni, la Royal Society a elle aussi récemment publié un rapport, qui recommande de prévoir une période de deux à cinq ans pendant laquelle entreprises et universités sont instamment priées d'étudier et comprendre la toxicité des nanotechnologies et de mettre au point des procédés permettant d'y faire face avant que les pouvoirs publics n'entreprennent d'établir une nouvelle réglementation dans ce domaine.

La sensibilisation du consommateur, l'étiquetage et l'instauration de normes et réglementations sur les nanoparticules sont des questions indiscutablement liées à la toxicité. Aujourd'hui, l'une des questions essentielles concernant la production de n'importe quel objet scientifique ou technique est de savoir dans quelle mesure consommateurs et citoyens considèrent les informations qui leur sont fournies comme fiables et crédibles. Les aliments génétiquement modifiés en sont un exemple patent, et effrayant, pour la plupart des entreprises intéressées par des investissements dans les nanotechnologies. La décision prise par certaines sociétés de créer et de distribuer des aliments génétiquement modifiés sans chercher à obtenir l'approbation du public ni étiqueter clairement ces produits alimentaires a suscité de vives réactions de rejet et a occasionné des débats sur l'étiquetage des produits alimentaires et la fiabilité des contrôles opérés par les pouvoirs publics et les sociétés ainsi que sur la garantie d'innocuité des aliments génétiquement modifiés.

Les nanotechnologies se heurtent à des problèmes analogues, surtout quand, pour susciter l'émotion ou persuader, on se sert de scénarios comme celui de la « gelée grise ». Même abstraction faite de ce genre d'alarmisme, le processus normal d'établissement de rapports sanitaires et de sécurité aboutit toutefois à tant d'avertissements et

¹⁹ <http://europa.eu.int/enterprise/reach/overview.htm> (consulté le 17 janvier 2006).

approbations contradictoires, et souvent incompréhensibles, qu'il sera difficile de faire efficacement connaître les risques exacts, quels qu'ils soient, que présentent les nanoparticules. Pour compliquer encore la situation, il n'existe pas encore de consensus sur la question de savoir s'il convient, aux fins de la réglementation et de l'étiquetage, de traiter les nanoparticules ou nanomatériaux comme des éléments entièrement nouveaux ou comme un sous-ensemble de matériaux existants. Les organismes de normalisation chargés des matériaux, depuis les organisations nationales de normalisation jusqu'à l'Organisation internationale de normalisation (ISO), auront la mission difficile de déterminer ce qui, le cas échéant, fait que les nanoparticules sont des substances nouvelles, distinctes des structures plus grandes de même composition chimique. C'est seulement alors que les autorités réglementaires pourront plus facilement juger si elles doivent affiner les systèmes de réglementation en vigueur ou en créer de nouveaux.

S'il est vrai que les matériaux habituels se comportent différemment à l'échelle nanométrique, il se peut que les systèmes existants d'évaluation des risques ne puissent pas mettre ces nouveaux dangers potentiels en évidence. Les recommandations énoncées par les experts de l'Union européenne

répondent à certains de ces problèmes (encadré 3) en demandant de nouvelles normes, de nouveaux outils, de nouvelles nomenclatures et de nouveaux systèmes de mesure particuliers à l'échelle nanométrique et aux nouvelles catégories de nanoparticules. Les organisations internationales peuvent jouer un rôle aussi bien en facilitant de telles initiatives qu'en encourageant leur utilisation et leur adoption par tous, non seulement aux États-Unis et en Europe, mais surtout dans des pays en développement comme la Chine, l'Inde, le Brésil et la République islamique d'Iran, qui commencent à élaborer à la fois des programmes de recherche en nanotechnologie et des formes de réglementation.

Ce problème a une composante politique et culturelle - l'attitude des hommes politiques et des citoyens vis-à-vis du risque et de la réglementation. La figure 8 illustre l'éventail d'attitudes susceptibles d'être adoptées sur ces questions avec, à gauche, la réglementation de l'Union européenne, plus axée sur le principe de précaution, et, à droite, le système des États-Unis orienté vers le marché et l'entreprise. Selon l'approche axée sur le principe de précaution, l'absence de données sur la sécurité ou sur l'efficacité des nanotechnologies constitue un avertissement de ne pas commercialiser les produits, tandis que selon l'approche orientée vers le marché elle signifie

Encadré 3 Recommandations de la Direction générale « Santé et protection des consommateurs » de la Commission européenne

1. Établir une nouvelle nomenclature pour les nanomatériaux.
2. Attribuer aux nouvelles nanoparticules un nouveau numéro d'enregistrement au CASRN (Chemical Abstracts Service Registry Number).
3. Promouvoir la science en collectant des données et en effectuant des analyses sur de nouvelles nanoparticules.
4. Mettre au point de nouveaux instruments de mesure.
5. Mettre au point des méthodes normalisées d'évaluation des risques.
6. Promouvoir les bonnes pratiques en matière d'évaluation des risques.
7. Créer des institutions chargées de contrôler le développement des nanotechnologies.
8. Établir le dialogue avec le public et l'industrie.
9. Élaborer des principes directeurs et des normes de production, de manutention, de commercialisation des nanomatériaux et d'évaluation des risques qu'ils présentent.
10. Revoir les réglementations existantes et les modifier quand besoin est afin de tenir compte des spécificités des nanotechnologies.
11. Confiner au maximum les nanoparticules libres existantes.
12. S'efforcer d'éliminer ou de réduire au minimum les rejets de nanoparticules dans l'environnement, quand c'est possible.

Image 8 : Attitudes vis-à-vis du risque²⁰

Réduire le risque au minimum

Différents degrés de tolérance du risque



Système en vigueur aux États-Unis : la réglementation actuelle est satisfaisante.

Proposition de la Commission européenne : exiger une approche progressive de l'évaluation des risques.

qu'aucune réglementation supplémentaire n'est nécessaire avant la mise sur le marché²¹.

Ce qui rend cette différence d'approche particulièrement alarmante, c'est qu'avec la mondialisation l'efficacité de la réglementation nationale et de la garantie de sécurité a acquis un caractère plus politique et est devenue plus problématique.

3.3 AU-DELÀ DE L'ÉVALUATION DES RISQUES

Les questions relatives à la sécurité, à la toxicité et à l'impact environnemental sont évidemment importantes et elles appellent des recherches plus poussées et une vigilance internationale accrue. Cependant, ce sont des problèmes techniques relativement limités, et le meilleur moyen de les résoudre est de recourir à des techniques pointues d'analyse des risques, à l'expérimentation scientifique et à la réévaluation juridique des systèmes réglementaires existants.

Il y a toutefois d'autres questions qui ne peuvent être abordées uniquement sous l'angle technique de l'analyse des risques. Ces questions éthiques et politiques de portée plus vaste concernent notamment la propriété intellectuelle, le secret et la légitimité des résultats scientifiques et le risque d'une fracture du savoir induite par le financement et par les implications juridiques de la propriété intellectuelle. De manière très générale, la question est de savoir si les nanotechnologies en tant que science ressembleront

à la science d'autrefois et utiliseront les mêmes procédés qu'elle, ou si, du fait de pressions politiques, sociales et juridiques nouvelles, elles se transformeront en quelque chose de moins familier.

Les recherches récentes en matière de biotechnologie et d'aliments génétiquement modifiés sont synonymes d'une certaine « perte d'innocence » par rapport à la pureté et au désintéressement de la science. Le fait que la recherche scientifique fondamentale soit ouvertement réglementée et socialement orientée ne semble plus être tabou pour bien des pays - et les nanotechnologies pourraient être l'un des premiers exemples de cas où les scientifiques eux-mêmes n'auront plus la capacité de diriger la recherche scientifique de manière autonome du fait de l'augmentation des pressions extérieures, émanant non seulement du monde commercial mais aussi de la société civile et des acteurs publics. Les effets de cette interaction nouvelle sont loin d'être clairs.

3.4 L'ÉTHIQUE DES SCIENCES

L'une des questions les plus préoccupantes soulevées par les nanotechnologies est celle qui concerne la structure même de la science - et cette question

ne se cantonne pas aux seules nanotechnologies. Ce qui est en jeu, c'est la légitimité des résultats scientifiques, mais aussi le crédit que leur accorde

²⁰ Figure fournie par Kristen Kulinowski du Centre pour les nanotechnologies environnementales et biologiques. Tous droits réservés.

²¹ En ce qui concerne l'approche axée sur le principe de précaution, voir également le rapport publié par la COMEST sous le titre : Le principe de précaution. UNESCO, 2005.

l'opinion, et l'utilisation, parfois abusive, qu'en font les pouvoirs publics, les entreprises et les organismes sans but lucratif. Au XX^e siècle, la science a de plus en plus été soumise à de nouvelles formes de surveillance et à de nouvelles pressions qui portent sur la production, la publication et le partage des informations scientifiques. L'une d'entre elles est manifestement l'extension du système des droits de propriété intellectuelle et de leur rémunération ; une autre concerne la surveillance publique croissante de la recherche scientifique et l'exigence faite à celle-ci de rendre des comptes aux citoyens ; une autre encore est l'utilisation, parfois abusive, des informations scientifiques par les pouvoirs publics dans un contexte de confidentialité accrue et d'actions antiterroristes inédites. Ajoutées les unes aux autres, ces pressions peuvent avoir des effets négatifs sur la nature et la qualité des activités scientifiques menées et peuvent introduire des incitations contraires aux valeurs d'objectivité et de désintéressement propres à la science.

En outre, en grande partie du fait de la mondialisation sans cesse croissante de la recherche scientifique et de l'expansion des réseaux qui l'alimentent et qui en exploitent les résultats, il est, depuis peu, difficile de répondre à la question de savoir qui profitera ou pâtira de ces dangers potentiels. Il n'y a pas de science de qualité sans infrastructures solides, et l'absence de telles infrastructures dans les pays en développement pourrait les priver des connaissances et pratiques scientifiques les meilleures et les plus fiables, soit parce qu'ils n'ont pas les moyens financiers nécessaires pour acquérir des informations scientifiques de premier ordre, soit parce qu'ils n'ont pas accès aux données et aux documents scientifiques archivés numériquement. Tant la fracture numérique que les questions que pose le contrôle politique des réseaux par certains pays pourraient avoir une incidence sur les formes de connaissances diffusées au niveau mondial dans le domaine des nanotechnologies.

Comme dans le cas des dangers imprévus et des risques de contamination, le plus grand problème que nous rencontrons est que nous savons peu de choses sur les risques et les avantages de la propriété intellectuelle. Nous ne disposons de presque aucun élément qui prouve l'efficacité (économique) d'une protection accrue des brevets ou du droit d'auteur, ou qui établisse qu'une protection moindre est bénéfique. L'on peut, néanmoins, se tourner vers d'autres domaines de la science et de la propriété intellectuelle pour obtenir des indications en ce qui concerne les nanotechnologies.

Trois sortes de controverses ont récemment semé la confusion en ce qui concerne l'utilisation de la propriété intellectuelle en sciences et dans le commerce basé sur les sciences. L'une avait pour objet un octroi trop libéral des brevets, qui peut conduire à une augmentation des frais de poursuite en justice et à des systèmes extrêmement complexes de concession croisée de licences et de commerce de brevets entre les sociétés et les gouvernements. L'autre concernait de nouvelles lois sur les bases de données, qui confèrent effectivement à telle ou telle entreprise des droits sur des faits - un principe auquel les systèmes de propriété intellectuelle mondiaux ont longtemps été formellement opposés et qui peut restreindre même la recherche fondamentale la plus inoffensive en instaurant des coûts prohibitifs. La troisième portait sur ce que l'on appelle les brevets sur les « méthodes commerciales » dans le domaine des technologies de l'information.

Ces brevets offrent un bon exemple de l'expansionnisme à outrance de la propriété intellectuelle. Ils consistent essentiellement en l'octroi de droits étendus à des sociétés qui utilisent l'informatique pour mettre en œuvre des processus déjà existants (deux exemples bien connus sont les brevets sur les enchères en ligne et ceux sur les achats en ligne). Les nanotechnologies pourraient elles aussi connaître pareille course aux brevets puisque, par définition, elles « exploitent des propriétés nouvelles » de matériaux bien connus.

Le risque engendré par une attribution excessive de brevets en matière de nanotechnologies est celui d'un « maquis des brevets » ou d'une « tragédie de la chasse gardée ». Les brevets sur les nanoparticules élémentaires et les processus utilisant des nanoparticules pourraient finir par être si détaillés que la capacité à créer un nouveau matériel - par exemple un système de filtration de l'eau utilisant des nanotubes de carbone pour produire de l'eau potable - pourrait se heurter à un enchevêtrement quasi impénétrable de titres de brevets concurrents. Dans ce cas, il faut avoir l'avis de juristes avant même que la recherche ne puisse commencer, et les intérêts commerciaux, mais aussi ceux des universités et des instituts universitaires, s'en trouvent menacés. Au lieu de stimuler les rémunérations, une telle complexité génère une inquiétude quant à la légalité de l'utilisation de ce qui peut être perçu comme des produits de la nature ou des processus naturels et à la responsabilité qui en découle. L'effet que cela pourrait avoir a quelque chose de terrifiant : seuls les plus riches auraient accès à certains types de recherches.

De tels effets sont encore plus sensibles lorsque l'objet de la protection est l'information scientifique - et non pas nécessairement des processus ou des machines - par exemple l'utilisation de séquences de gènes, d'informations contenues dans une base de données ou d'autres types de contributions essentielles, mais immatérielles, au processus scientifique. Dans ce cas, même l'utilisation d'informations concernant des produits à l'échelle nanométrique pourrait nécessiter des droits et contrats de licence. Le fait que les pays en développement peuvent avoir ou concevoir leurs propres lois nationales sur la propriété intellectuelle ne les soustrait pas à ces problèmes. Des organisations internationales telles que l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle et l'Organisation mondiale du commerce, ainsi que des groupes industriels dont les recettes commerciales proviennent exclusivement de l'exploitation de la propriété intellectuelle (par exemple les industries cinématographique et phonographique), se sont âprement battus au cours des dix dernières années pour harmoniser et renforcer les lois sur la propriété intellectuelle dans presque toutes les parties du monde.

La solution à ce problème consiste à encourager - et, entre gouvernements nationaux, à exiger - un accès libre aux résultats et matériels de la recherche financée par des fonds publics. Au mieux, la tendance actuelle à une protection toujours plus grande de la propriété intellectuelle générera des frais de transaction importants du fait de la complexité qu'elle introduit et, au pire, elle étouffera littéralement la capacité des scientifiques à mener leurs recherches de manière indépendante et à vérifier leurs hypothèses. Les incitations sont faciles à mettre en place mais, en matière de propriété intellectuelle, il est très difficile, une fois dans l'impasse, de revenir en arrière. Le système des brevets ne saurait remplacer l'examen par les pairs et la reproduction des travaux scientifiques, et pourtant les incitations poussent les scientifiques à s'orienter vers des recherches inédites et brevetables plutôt que vers l'obtention de résultats fiables et reproductibles, ou de preuves expérimentales claires et de portée générale qui risquent d'avoir des applications pratiques limitées. Ce dont on a grand besoin, c'est que soient largement diffusées des bases de données d'accès libre contenant les résultats de recherches financées par des fonds publics - non seulement sous forme électronique, mais également en version imprimée pour les pays où l'accès à l'Internet est intermittent ou peu fiable. Il faut aussi que soient diffusées de nouvelles règles applicables aux scientifiques tributaires de fonds

publics - règles qui doivent les encourager à publier leurs travaux avant de chercher à obtenir un titre de propriété intellectuelle. Ce n'est qu'en incitant les scientifiques à travailler dans l'intérêt public mondial que l'on pourra maintenir un système de savoir scientifique ouvert, fiable et reproductible.

Par ailleurs, la science subit un deuxième type de pressions, qui tiennent au contrôle public croissant auquel sont soumis la recherche et les résultats scientifiques. Un certain nombre d'événements qui ont eu un grand retentissement (controverse d'Asilomar au sujet de l'invention de la recombinaison des molécules d'ADN, catastrophes de Tchernobyl et de Bhopal, crise de l'ESB, polémique publique en Europe autour des aliments génétiquement modifiés) ont incité les pouvoirs publics et l'opinion à se méfier des déclarations des scientifiques. Mais, pour cette même raison, la recherche scientifique est devenue de plus en plus sensible aux demandes de la société et de la population ; deux exemples illustrent bien ce point : les pressions exercées sur la médecine par les militants anti-sida pour intensifier les recherches sur cette maladie et le succès des écologistes, qui ont réussi à instituer et à maintenir une protection des habitats d'espèces menacées face aux exigences de la pêche et de l'agriculture. Ces nouveaux modes d'interaction entre les scientifiques et le public naissent souvent à la faveur des intérêts des grandes entreprises. Dans le cas des nanotechnologies, en particulier, on a plus que jamais le sentiment que l'implication du public doit être plus précoce et plus fréquente afin d'éviter le genre de réactions hostiles qui ont accompagné l'introduction des OGM.

Les institutions internationales telles que l'UNESCO peuvent servir efficacement de médiateurs ou de facilitateurs de ce dialogue entre les citoyens et les scientifiques. Si la recherche en matière de nanotechnologies doit avoir pour objectif social de résoudre les problèmes les plus urgents que rencontre la majorité des gens, alors il faut pouvoir compter sur des personnes et des institutions capables de mettre en relation, d'une part, les scientifiques, bailleurs de fonds et entrepreneurs à la recherche de solutions à ces problèmes et, d'autre part, des experts locaux et des experts dans des domaines autres que les nanotechnologies (par exemple, en dépollution environnementale ou en politiques relatives à l'eau ou à l'énergie dans les pays en développement).

Le troisième type de pressions qui s'exerce sur la science est bien moins clair : c'est celui qui concerne la protection du secret et la menace terroriste. Deux

sortes de préoccupations sont en jeu ici. Il s'agit d'abord de la crainte que la recherche, même fondamentale, en matière de nanotechnologies puisse être utilisée par les terroristes pour créer de nouveaux types d'armements à des fins criminelles, ou que de telles armes, créées par les gouvernements nationaux, ne se retrouvent en fin de compte entre les mains de terroristes. C'est cette inquiétude qui pousse à considérer comme confidentiels ou secrets de nombreux travaux de recherche en nanotechnologies (ainsi qu'en biotechnologie ou en chimie). À l'inverse, le risque peut aussi être que des gouvernements se prévalent abusivement de la menace terroriste pour classer secrètes des recherches ou - ce qui est plus vraisemblable - pour rejeter des conclusions scientifiques qu'ils jugent incompatibles avec leurs

objectifs politiques. La question ici n'est pas tant celle des objectifs particuliers des gouvernements nationaux que celle de la légitimité des résultats scientifiques et de la séparation effective entre les intérêts de la science et des gouvernements. Moins la séparation entre les uns et les autres est nette, moins la science, même la plus pointue, aura de chances d'apparaître légitime et désintéressée aux yeux des opinions nationales et internationales. Encore une fois, les organisations internationales ont ici un rôle à jouer pour contribuer à définir de nouvelles règles de conduite scientifique - des règles qui concilient la nécessité évidente de libérer la science de toutes entraves et les pressions politiques qui visent à empêcher que des informations potentiellement dangereuses ne soient divulguées.

3.5 SOURCES DE CONFUSION - DES QUESTIONS ÉTHIQUES QUI N'EN SONT PAS

Deux aspects du débat sur les retombées et les menaces éthiques et sociales des nanotechnologies ont fait récemment l'objet d'une grande attention : il s'agit du scénario de la « gelée grise » et de la question du « post-humanisme ». Le scénario de la « gelée grise » repose sur la crainte que les engins nanotechnologiques soient programmés pour s'autoreproduire, ou « évoluent » et deviennent des engins capables de s'autoreproduire, et sur le risque, dans ces cas-là, qu'ils en viennent à détruire le monde naturel. Aucun objet nanotechnologique n'est aujourd'hui capable de s'autorépliquer (sauf à considérer que des objets comme l'ADN ou les virus répondent à la définition des nanotechnologies, ce qui brouille encore davantage le débat). Pour autant, certains philosophes, des spécialistes d'éthique et de nombreux scientifiques font souvent comme si de tels objets existaient ou étaient sur le point d'exister. Leurs propos découlent dans bien des cas d'une certaine forme de « déterminisme technologique », partisans et adversaires posant en principe que la technologie se développe de façon autonome et échappe au contrôle humain, social ou étatique. Faute d'expérimentation, le débat se polarise vite : on est pour ou contre les nanotechnologies.

La « gelée grise » est une source de confusion car elle contraint le débat sur les questions éthiques et sociales à se porter sur les dangers et les

promesses techniques de la recherche de demain au lieu de considérer le système réel de contrôle et de réglementation de la recherche qui existe aujourd'hui. Les moyens de parer au déferlement de « gelée grise » étant tout aussi hypothétiques que le scénario lui-même, l'attention se détourne des pratiques actuelles de la science et de la technologie et de la nécessité d'assurer un contrôle vigilant et d'avoir un débat qui se préoccupe des problèmes et des pratiques du moment, et non de scénarios futuristes.

La question du « post-humanisme » donne lieu au même type d'observation. Le débat tourne autour des différentes utilisations faites des nanotechnologies pour améliorer, corriger, remplacer ou développer des caractéristiques humaines. Cela va des naocapteurs ajoutés à la rétine pour améliorer la vue aux implants cochléaires qui améliorent l'audition, en passant par les technologies destinées à accroître les performances sportives ou les nouvelles formes de chirurgie esthétique.

Le débat sur le post-humanisme soulève un problème inverse de ceux que pose le scénario de la « gelée grise ». Il repose sur l'hypothèse que les dilemmes éthiques suscités par les nanotechnologies sont devant nous et que nous devons nous préparer à y faire face, alors qu'il s'agit en fait de questions déjà

actuelles, comme le dopage, le dépistage génétique ou le problème de confidentialité soulevé par l'exploitation des technologies d'information implantées dans le corps. Les nanotechnologies devraient au moins être l'occasion de reconsidérer ces questions sous un nouvel angle et d'essayer d'apporter des solutions concrètes aux problèmes de cet ordre qui se posent aujourd'hui et se poseront demain. L'UNESCO a déjà publié des analyses (par exemple Le clonage humain - questions éthiques) qui pourraient s'appliquer, avec seulement quelques modifications mineures, à la question de l'amélioration humaine par les nanotechnologies.

Si les responsables, les élus, les ONG et les groupes de pression pouvaient être convaincus de se détourner de ces deux sources de confusion, ils pourraient se pencher sérieusement sur un certain nombre de questions qui exigent une attention urgente et de nouvelles formes de contrôle stratégique et réglementaire : toxicité, menace écologique et risques de contamination, étiquetage, information du consommateur et réglementation des produits,

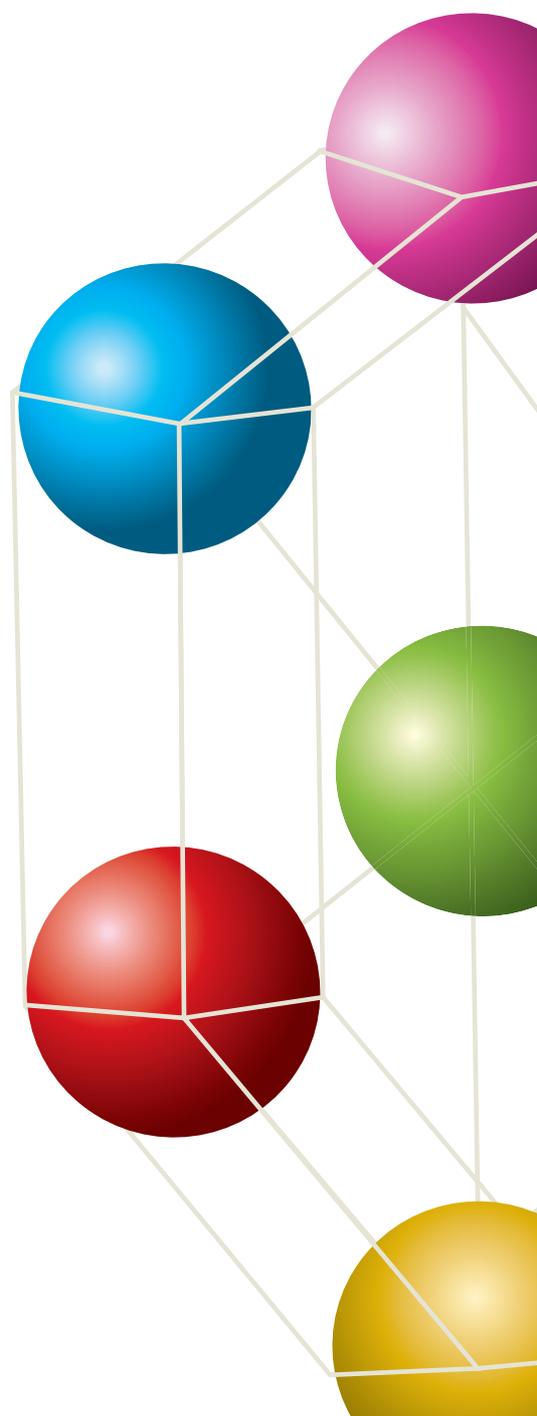
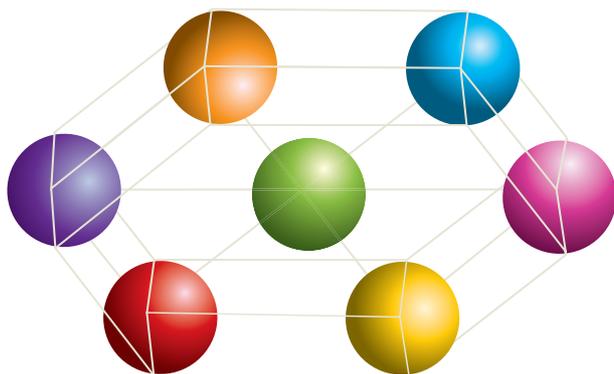
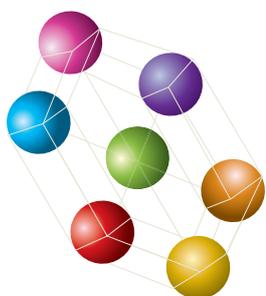
propriété intellectuelle, protection de l'information et fiabilité et légitimité des recherches scientifiques internationales, risque de fracture scientifique et technique au niveau mondial, et, surtout, promotion des utilisations des nanotechnologies qui contribuent à répondre aux besoins les plus pressants du plus grand nombre.

Nombre de ces questions recoupant d'autres débats éthiques et politiques actuels, il faut les inscrire dans le cadre des discussions en cours plutôt que partir de zéro. Par exemple, les questions relatives à la propriété intellectuelle sont déjà largement débattues dans le cadre des discussions sur la biotechnologie et la technologie de l'information ; de même, les débats concernant l'éthique médicale couvrent déjà les questions du dopage, du risque médical et de la recherche sur des sujets humains. Si les nanotechnologies sont nouvelles et passionnantes, les questions éthiques et politiques qu'elles soulèvent ne sont pas radicalement différentes de celles qui nous occupent déjà. Mais elles peuvent être l'occasion de débattre de ces questions de façon plus constructive.

4

CONCLUSION

Les nanotechnologies sont à la croisée des chemins. L'émergence d'un consensus concernant la direction, la sécurité, l'intérêt et le financement des nanotechnologies dépendra de la définition qui en sera donnée et des personnes qui en seront par conséquent parties prenantes. On peut dire sans risque d'erreur que, notre monde devenant de plus en plus tributaire de la science et de la technologie, et les populations étant de plus en plus sensibilisées aux dangers et possibilités de celles-ci, l'implication des participants de toute sorte « remontera » jusqu'au cœur du travail scientifique lui-même.



5

APPENDICE

Liste de rapports sur les nanotechnologies

La liste ci-dessous indique les rapports les plus récents publiés sur les nanotechnologies, leurs implications et les questions sociales, politiques et éthiques.

- **UK Royal Society and Royal Academy of Engineering Report**
Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties'
<http://www.nanotec.org.uk>
- **The Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC)**
'The Big Down'
<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>
'Down on the Farm'
http://www.etcgroup.org/documents/ETC_DOTFarm2004.pdf
<http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=485>
- **Demos**
'See Through Science'
<http://www.demos.co.uk/catalogue/paddlingupstream>
- **Commission européenne - Santé et protection des consommateurs**
« Les risques potentiels associés aux nanotechnologies »
1^{er}-2 mars 2004
http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm
- **Swiss Re Report**
'Nanotechnology - small matter, many unknowns'
<http://www.swissre.com/INTERNET/pwswpspr.nsf/alldocbyidkeylu/ULUR-5YAFFS>
- **NSF/Meridian Institute International**
"Nanodialogues" on Risk, Nanotechnology and the Poor and Regulation'
<http://www.nanodialogues.org>
- **NSF NBIC Report**
'Converging Technologies for Improving Human Performance'
<http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies>
- **National Research Council**
'Small Wonders, Endless Frontiers, a Review of the National Nanotechnology Initiative' (2002)
<http://www.nap.edu/openbook/0309084547/html/1.html>
- **UK Nanojury 2005**
<http://www.nanojury.org>
- **Woodrow Wilson Report**
'Nanotechnology and Regulation: The case of the TSCA'
<http://nanotechcongress.com/Nanotech-Regulation.pdf>

Division de l'éthique des sciences et des technologies de l'UNESCO

La Division de l'éthique des sciences et des technologies de l'UNESCO reflète la priorité que l'UNESCO accorde à l'éthique des sciences et des technologies, en particulier à la bioéthique. Un des objectifs de la Stratégie à moyen terme de l'UNESCO pour 2002-2007 est de « promouvoir des principes et des normes éthiques pour guider le progrès scientifique, le développement technologique et les transformations sociales ».

La Division a notamment pour vocation d'apporter un soutien aux États membres de l'UNESCO désireux de lancer des activités dans le champ de l'éthique des sciences, telles que l'élaboration de programmes d'enseignement, la création de comités nationaux d'éthique, l'organisation de conférences ou la mise en place et le suivi de chaires UNESCO.

La Division assure également le secrétariat exécutif de trois organes internationaux d'éthique : la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST), le Comité international de bioéthique (CIB) ainsi que le Comité intergouvernemental de bioéthique (CIGB).

UNESCO

Division de l'éthique des sciences et des technologies

Secteur des sciences sociales et humaines

1, rue Miollis

75732 Paris Cedex 15

France

<http://www.unesco.org/shs/ethics>

