



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

Éditions
UNESCO

Nanotechnologies, éthique *et* politique

Édité par Henk A. M. J. ten Have

Kyunghee Choi

Erin Court

Abdallah Daar

Edith Deleury

Diane Duquet

Bert Gordijn

Donald Evans

Henk A. M. J. ten Have

Michele Jean

Jixing Liu

Fabio Salamanca-Buentello

Joachim Schummer

Peter A. Singer

Margareth Spangler Andrade

Collection Éthiques

Publié par l'Organisation des Nations Unies
pour l'éducation, la science et la culture.
7, place de Fontenoy
75732 Paris 07-SP
France

© UNESCO 2008
Tous droits réservés

ISBN 978-92-3-204051-0

Titre original : Nanotechnologies, Ethics and Politics,
2007. Publié par l'Organisation des Nations Unies
pour l'éducation, la science et la culture.

Les idées et opinions exprimées dans cette publication
sont celles des auteurs; elles ne reflètent pas
nécessairement les points de vue de l'UNESCO
et n'engagent en aucune façon l'Organisation.

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.

Mise en page : Éditions UNESCO
Impression : Darantiere, Quétigny
Imprimé en France

NANOTECHNOLOGIES, ÉTHIQUE ET POLITIQUE

Édité par Henk A. M. J. ten Have

Collection « Éthiques »

Éditions UNESCO

SOMMAIRE

Préface	7
Auteurs	11
L'UNESCO, l'éthique et les technologies émergentes	13
<i>Henk A. M. J. ten Have</i>	
PREMIÈRE PARTIE ÉVOLUTION SCIENTIFIQUE	
Évolution des nanotechnologies	41
<i>Margareth Spangler Andrade</i>	
Les dernières avancées en nanotechnologie	55
<i>Jixing Liu</i>	
PARTIE II ENJEUX ÉTHIQUES	
Identifier les questions éthiques des nanotechnologies	87
<i>Joachim Schummer</i>	
Les questions éthiques en nanomédecine	109
<i>Bert Gordijn</i>	
Éthique, nanotechnologie et santé	137
<i>Donald Evans</i>	
PARTIE III ENJEUX POLITIQUES	
La nanotechnologie et le monde en développement	171
<i>Erin B. Court, Fabio Salamanca-Buentello, Peter A. Singer et Abdallah S. Daar</i>	
Participation du public et éducation pour l'éthique en nanotechnologie	199
<i>Kyunghee Choi</i>	
Évaluation précoce et décisions politiques	223
<i>Michèle S. Jean, Édith Deleury et Diane Duquet</i>	
Annexe 1	239
Annexe 2	243
Annexe 3	245
Liste des abréviations	247
Index	251

PRÉFACE

Les États membres de l'UNESCO ont créé la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST) en 1998. Composée de dix-huit éminents spécialistes de différents pays possédant diverses expertises professionnelles, la COMEST conseille l'UNESCO en matière d'éthique des sciences et des technologies. Elle concentre notamment son attention sur l'éthique de l'environnement, sujet traité dans un ouvrage publié dans la collection « Éthiques » publiée par l'UNESCO (*Éthiques de l'environnement et politique internationale*, 2006). La COMEST se préoccupe également d'un autre domaine, celui de l'éthique de la science et de la recherche, qu'elle examine dans cet ouvrage qui offre une analyse et des informations sur les codes de conduite destinés aux chercheurs appartenant à différentes régions du monde, ainsi qu'à diverses professions et disciplines. Elle se préoccupe d'un troisième domaine, celui de l'éthique de la technologie. La COMEST travaille, par exemple, avec des agences spatiales pour attirer l'attention sur les questions éthiques posées par la technologie et l'exploration spatiales. Ce troisième secteur concerne maintenant aussi les dimensions éthiques des nanotechnologies qui constituent le sujet même de cet ouvrage.

En tant qu'instance éthique internationale, la COMEST a pour mission de se proposer en tout premier lieu comme un forum intellectuel destiné à faciliter l'échange des idées et des expériences visant à détecter les signes précurseurs de situations à risque, à conseiller les pouvoirs publics à ce sujet et promouvoir le dialogue entre les communautés scientifiques, les pouvoirs publics et le grand public. Conformément à

son mandat, la COMEST a analysé les technologies de l'information, l'utilisation des ressources en eau et les techniques hydrologiques, ainsi que les technologies de l'énergie et de l'espace.

Les nanotechnologies font partie des technologies dont le développement est le plus rapide aujourd'hui. Tous les experts s'accordent sur le fait que, comme il en a été précédemment des technologies du nucléaire, de l'information et de la biotechnologie, la nanotechnologie aura tôt ou tard un énorme impact sur la société et la vie humaines. Ses effets seront même plus importants, car elle combine les technologies qui l'ont précédée. Les nanotechnologies concernent de nombreuses activités humaines et peuvent donc modifier jusqu'à nos manières de vivre. Nous sommes à la veille d'une nouvelle révolution technologique. Il est donc très opportun d'évaluer maintenant ses implications éthiques. Certes, cette évaluation ne peut être que préliminaire, car il est impossible de prévoir avec précision comment vont évoluer les sciences et les technologies. De plus, l'éthique est souvent perçue comme n'en offrant que trop peu et trop tard son point de vue sur leurs progrès. Il n'en est pas moins vrai que l'opportunité se présente pour engager une réflexion éthique prospective (plutôt que rétrospective, comme c'est habituellement le cas) sur les nanotechnologies. Ce type de réflexion vise à fournir des conseils au fur et à mesure que cette nouvelle science se développe, de manière à soutenir ainsi les arguments permettant que ses développements soient en accord avec certaines valeurs humaines fondamentales et cherchent à résoudre d'importants problèmes mondiaux.

Penser que la réflexion éthique sur les nanotechnologies est inutile à l'échelle mondiale est une erreur. Il est évident que plusieurs pays en développement s'investissent de manière importante dans les nanotechnologies. Des pays tels que la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Afrique du Sud et le Mexique possèdent d'ambitieux programmes de recherche dans ce domaine. Le risque est qu'avec la rapide croissance des nanotechnologies, l'écart entre les pays les plus développés et ceux qui le sont moins non seulement augmente, mais encore qu'il change de nature. Comme il en est de chaque nouvelle technologie, la nanotechnologie devrait pouvoir bénéficier à tous les êtres humains, où qu'ils vivent. Tous les pays devraient être impliqués dans son développement de manière à pouvoir partager les bénéfices de cette science et de cette technologie. Un autre risque, cependant, est que les pays en développement ne deviennent à l'avenir que des terrains d'essais et des sujets

d'expérimentations, ne récoltant pas ainsi les bienfaits de la recherche, mais seulement ses maux, ses inconvénients et ses effets négatifs. C'est pourquoi les nouvelles avancées de cette science et de cette technologie soulèvent la question éthique fondamentale de savoir comment les orienter pour résoudre des problèmes mondiaux tels que la pauvreté, la dégradation de l'environnement, la violence et les maladies. C'est précisément pourquoi la réflexion sur les questions éthiques concernant ce stade préliminaire de la recherche est cruciale pour une institution telle que l'UNESCO.

Cet ouvrage offre surtout une information sur la nanotechnologie et son état actuel. Il analyse également minutieusement les questions éthiques concernant les nanotechnologies. Enfin, il aborde les enjeux politiques. La COMEST développe actuellement un ensemble de conseils et de recommandations concernant l'éthique des nanotechnologies destiné à l'action internationale menée par l'UNESCO. Ce livre constitue donc le point de départ d'autres recherches sur les questions éthiques. Il est également destiné à stimuler le dialogue interdisciplinaire, non seulement entre scientifiques et éthiciens, mais encore entre les pouvoirs publics, le grand public et les groupes spécialement intéressés par ces sujets.

Je tiens à remercier ici les chercheurs dont les efforts ont contribué à clarifier, dans cet ouvrage, les questions éthiques qu'impliquent les nanotechnologies. J'espère qu'il permettra d'améliorer de manière significative l'attention portée à ces questions et de stimuler d'autres débats sur l'éthique des nanotechnologies.

Pilar Armanet

Présidente

*Commission mondiale d'éthique
des connaissances scientifiques et
des technologies (COMEST)*

AUTEURS

Kyunghee Choi Ehwa Woman's University, Korea Daehyon-Dong,
Séoul (République de Corée)

Erin Court McLaughlin-Rotman Centre for Global Health,
Programme des sciences de la vie, d'éthique et de politique,
University Health Network et université de Toronto (Canada),
actuellement à l'université d'Oxford (Royaume-Uni)

Abdallah Daar McLaughlin-Rotman Centre for Global Health,
Programme des sciences de la vie, d'éthique et de politique,
University Health Network et université de Toronto (Canada)

Édith Deleury Présidente de la Commission de l'éthique de la science
et de la technologie (CEST), Québec (Canada)

Diane Duquet Coordinatrice, Commission de l'éthique de la science
et de la technologie (CEST), Québec (Canada)

Bert Gordijn Département d'éthique, de philosophie et d'histoire
de la médecine, Centre médical, université Radboud, Nijmegen
(Pays-Bas)

Donald Evans Centre de bioéthique, École de médecine Dunedin,
université d'Otago (Nouvelle-Zélande)

Henk A. M. J. ten Have Division de l'éthique des sciences et des technologies, UNESCO, Paris (France)

Michèle Jean Faculté des études supérieures, université de Montréal, Montréal (Canada)

Jixing Liu Institut de physique théorique, Académie des sciences de Chine, Beijing (République populaire de Chine)

Fabio Salamanca-Buentello McLaughlin-Rotman Centre for Global Health, Programme des sciences de la vie, d'éthique et de politique, University Health Network et université de Toronto (Canada)

Joachim Schummer Département de philosophie, université technique de Darmstadt, Darmstadt (Allemagne)

Peter A. Singer McLaughlin-Rotman Centre for Global Health, Programme des sciences de la vie, d'éthique et de politique, University Health Network et université de Toronto (Canada)

Margareth Spangler Andrade Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte (Brésil)

Introduction

L'UNESCO, L'ÉTHIQUE ET LES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

Henk A. M. J. ten Have

Le 16 novembre 1945, les représentants de trente-sept pays réunis à Londres ont décidé de créer une institution destinée à construire une authentique culture de la paix par l'éducation, la science, la culture et la communication. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, cette nouvelle institution donnait à la communauté internationale l'espoir de vivre dans un monde où régneraient la solidarité et la dignité humaines. L'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) est la seule institution des Nations Unies ayant reçu des responsabilités concernant la recherche scientifique. Cela implique donc également qu'elle veille à ce que les avancées de la science et de la technologie s'insèrent dans le cadre du « respect universel de la justice, de la loi, des droits de l'homme et des libertés fondamentales pour tous les peuples », tel qu'il est exprimé dans l'article 1 de l'Acte constitutif de l'UNESCO (1945). Les aspects éthiques de la recherche scientifique doivent donc être pris en considération. Dans les années 1980, l'UNESCO a concentré ses activités sur les implications éthiques concernant le génome humain. En 1989, sa Conférence générale a invité son Directeur général à introduire un système permanent de consultation destiné à échanger les informations et les expériences concernant l'implication éthique des sciences et des technologies contemporaines (UNESCO, 1989). Ce projet visait à ce que l'UNESCO devienne un centre de partage d'information et de documentation sur l'éthique des sciences et des technologies au cœur du système des Nations Unies afin de promouvoir une réflexion prospective sur ces questions.

Depuis, l'UNESCO s'est investie dans l'organisation et la promotion d'activités internationales sur la bioéthique (voir, par exemple, Sass, 1991). Pendant la Conférence générale de 1993, les États membres ont demandé à cette institution de réfléchir à la création d'un cadre international juridique destiné à protéger le génome humain et d'en examiner la faisabilité. Cette demande était motivée non seulement par le désir d'assurer que la liberté, la dignité et l'identité de la personne humaine reçoivent l'attention nécessaire, mais encore par la nécessité que la participation de tous soit respectée au fur et à mesure que progresseraient les sciences médicales et des sciences de la vie, et que leurs bénéfices en résultant apparaîtraient (UNESCO, 1993). Au cours de la même session, les États membres ont décidé de créer un Comité international de bioéthique (CIB) destiné à lancer un véritable programme d'éthique des sciences et des technologies et, en particulier, de bioéthique. En 2002, l'éthique est devenue l'une des cinq priorités de l'UNESCO.

L'actuelle révolution en sciences et technologies oblige à tenir compte du fait que le progrès scientifique non contrôlé n'est pas toujours acceptable et qu'à tout le moins, il exige une sérieuse réflexion éthique. Le besoin d'établir des valeurs et des normes communes dans tous les pays, ainsi mis à pied d'égalité, et de promouvoir des principes et des régulations guidant les progrès scientifiques et le développement technique, est devenu de plus en plus aigu, en particulier dans les pays en développement qui ne bénéficient pas de manière équitable de ces avancées. Les travaux de l'UNESCO sur l'éthique les concernant reflètent ces préoccupations mondiales qui ne s'enracinent pas moins pour autant dans la diversité culturelle, juridique, philosophique et religieuse des différentes sociétés humaines. Aujourd'hui, l'éthique ne concerne plus seulement la science et ses divers développements, car elle a désormais une dimension culturelle et éducative fondamentale. Enfin, la priorité donnée à l'éthique par l'UNESCO illustre combien l'éthique des sciences et des technologies dépend de plus en plus de la responsabilité de la communauté politique mondiale (Lenoir, 1997).

LA COMEST, OU RELIER LA SCIENCE ET LES POUVOIRS PUBLICS

le programme de l'éthique de l'UNESCO s'est étendu au-delà du domaine de la bioéthique en 1998, année de la création de la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST). Cette commission se compose de dix-huit membres

choisis parmi d'éminentes personnalités scientifiques indépendantes et d'autres spécialistes appartenant à différentes régions du monde et à diverses disciplines comprenant l'éducation, l'ingénierie, l'histoire, le droit, les mathématiques, la philosophie, les sciences sociales et politiques. Elle a pour responsabilité de conseiller l'UNESCO sur des sujets concernant l'éthique des sciences et des technologies. Le secrétariat de la COMEST et du Comité international de bioéthique (CIB) est établi dans la Division de l'éthique des sciences et des technologies, Secteur des sciences sociales et humaines. La COMEST a pour mandat d'être un organe international de conseil et un forum intellectuel destiné au partage des idées et des expériences, ainsi qu'à encourager la communauté scientifique à examiner les questions éthiques fondamentales – et à détecter les signes précurseurs des situations à risque. Elle formule les principes éthiques pouvant éclairer les choix impliqués par de nouvelles découvertes et leurs effets. Elle conseille les pouvoirs publics au sujet de leurs implications politiques et favorise le dialogue entre la communauté scientifique internationale, les gouvernements et le grand public sur des problèmes délicats concernant aussi bien le développement durable, l'utilisation et la gestion de l'eau douce, la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie, l'exploration et la technologie spatiales, que les problèmes des droits, des directives et de l'équité relatifs à l'expansion rapide de la société de l'information. La COMEST remplit son mandat en réunissant des experts chargés d'étudier des problèmes spécifiques et de diffuser les résultats de leurs analyses dans des publications. L'éthique et la technologie de l'espace, l'éthique et l'énergie, ainsi que l'éthique concernant l'utilisation de l'eau ont déjà été examinés et donné lieu à des publications très largement distribuées (notamment Poupodou, 2000 et COMEST, 2004).

L'une de ces récentes publications concerne le principe de précaution. Ce principe étant sujet à controverses du point de vue international, un groupe d'experts en a analysé le concept et ses applications dans divers contextes afin de clarifier d'éventuelles incompréhensions. La publication en résultant (COMEST, 2005a) est la première offrant une approche générale de l'éthique environnementale. L'éthique de l'environnement ne peut être abordée de manière classique. Pour qu'elle prenne place dans l'agenda international, il faut développer une méthode rigoureuse qui tienne compte du fait que l'éthique environnementale, comparée à la bioéthique, est un récent sujet de l'éthique

appliquée et que ses principes de base soulèvent de nombreux débats et controverses.

Ces considérations s'appliquent à l'éthique des technologies dont le plus récent sujet concerne les nanotechnologies. Bien que la COMEST ait travaillé sur l'éthique des technologies spatiales, les travaux présentés ici sont les premiers à traiter du domaine des technologies nouvelles et émergentes.

Afin de mettre continuellement à jour sa perspective mondiale, la COMEST organise tous les deux ans une session publique réunissant pendant plusieurs jours des scientifiques, des éthiciens, des juristes et des représentants des pouvoirs publics pour leur permettre de discuter ensemble de questions éthiques cruciales soulevées par les sciences et les technologies. Ces conférences, très fréquentées, sont organisées dans différentes régions du monde afin d'offrir une plateforme commune favorisant la discussion de problèmes mondiaux et stimulant le débat éthique et la création de réseaux d'experts dans ces régions. Récemment, des conférences se sont tenues à Rio de Janeiro (COMEST, 2003), Bangkok (COMEST, 2005*b*) et au Sénégal (décembre 2006). Le Directeur général de l'UNESCO a créé un comité interagences des Nations Unies sur la bioéthique dans le but de coordonner le nombre croissant d'activités internationales dans ce domaine. Ce comité comprend des organisations intergouvernementales appartenant ou non au système des Nations Unies, notamment l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation internationale du Travail (OIT), le Haut-Commissariat des Nations Unies aux droits de l'homme (HCDH) et l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (OMPI), ainsi que le Conseil de l'Europe, la Commission européenne (CE), l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et l'Organisation arabe pour l'éducation, la culture et la science (ALECSO). Ce comité offre un forum où débattre et partager l'information. Il favorise la coordination de diverses activités, facilite la collaboration et mène des actions concertées (notamment l'examen de questions éthiques concernant les droits de la propriété intellectuelle). Il se réunit au moins une fois par an et prépare un rapport soumis au Secrétaire général des Nations Unies, ainsi qu'aux différents responsables des organisations concernées.

Les activités de l'UNESCO en éthique des sciences et des technologies revêtent donc des formes multiples et concernent de nombreux sujets, notamment la mise en forme de recommandations destinées aux

pouvoirs publics, la création et le développement de directives, normes et instruments juridiques. L'UNESCO soutient également le développement de réseaux régionaux, participe à la création et au renforcement des capacités nationales, promeut l'éthique en science de l'éducation et produit des matériels éducatifs. De plus, elle remplit la fonction d'« observatoire éthique » et joue le rôle, si important, de catalyseur et de réservoir d'idées (*think tank*), informant l'opinion publique des implications des progrès des sciences et des technologies sur les droits humains.

Il s'agit donc de trois sortes d'activités : tout d'abord, créer un cadre normatif consistant à développer des normes internationalement acceptées, destinées à guider les pouvoirs publics des États membres ; ensuite, renforcer les capacités destinées à améliorer les infrastructures éthiques des États membres afin de leur permettre de mieux répondre aux questions éthiques émergeant des applications et des progrès des sciences et des technologies ; enfin, stimuler la vigilance générale en soutenant et promouvant les débats publics sur les questions éthiques afin que le plus grand nombre possible d'intéressés aient une meilleure compréhension des choix moraux en jeu dans notre société mondialisée.

LE CADRE NORMATIF

Conséquence de la dissémination mondiale des sciences et des technologies, la dimension internationale de l'éthique ne cesse de devenir de plus en plus importante. La recherche progresse rapidement dans des centres qui, toujours plus nombreux, s'internationalisent, tandis que les pays en développement choisissent de plus en plus de sujets de recherche de pointe. Les pratiques des soins de santé se sont mondialisées tandis que les directives et les contextes juridiques les concernant diffèrent et sont parfois même inexistantes. Les directives concernant les transplantations et les procédures de dons d'organes varient d'un pays à l'autre, ces différentes approches ont conduit à des abus, tels le trafic d'organes et la commercialisation des pratiques de transplantation. De plus, les charges et les bénéfices des progrès des sciences et des technologies ne sont pas équitablement distribués. Les pays les plus pauvres risquent d'être exclus des bénéfices des progrès biomédicaux. Le risque existe aussi que des normes morales duales, ou du moins différentes soient appliquées dans différentes régions du monde. Tandis que les pays développés créent sans cesse de nouvelles directives et lois concernant le

développement scientifique, les pays les moins développés ne disposant pas de tels cadres juridiques courent le risque de devenir des terrains où se déversent des déchets toxiques et se pratiquent des expérimentations à risque. Le récent scandale des déchets toxiques en Côte d'Ivoire et le film *La Constance du jardinier* illustrent les dangers entraînés par des cadres juridiques et normatifs différents.

De nombreux pays possèdent des infrastructures bioéthiques limitées, car ils manquent d'expertise, de programmes éducatifs, de comités de bioéthique et de cadres juridiques. La nature mondiale des sciences et des technologies nécessite une approche mondiale de l'éthique. Les États membres de l'UNESCO l'ont mandatée pour établir les références éthiques universelles nécessaires pour résoudre les problèmes soulevés par les rapides progrès des sciences et des technologies. Ces États veulent travailler ensemble pour identifier des principes fondamentaux et des valeurs communes concernant ces dernières. Établir des normes éthiques est une nécessité maintenant ressentie dans le monde entier, souvent exprimée par les scientifiques et les praticiens eux-mêmes, mais également par les législateurs, les pouvoirs publics et les citoyens. Toutefois, l'implication d'une organisation intergouvernementale dans l'éthique fait en même temps l'objet de controverses. En effet, certains pensent qu'il n'est pas souhaitable que des directives éthiques émanent des gouvernements pour éviter d'éventuelles interférences politiques, et que mieux vaudrait confier cette tâche à la société civile, aux organisations professionnelles et au débat public. Des institutions telles que l'UNESCO ne devraient ni réguler, ni dicter, ni imposer des directives éthiques. Par ailleurs, nombre de gouvernements en ont déjà formulé. Quelques pays, en particulier en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique latine ont déjà proposé des projets de « législation bioéthique », notamment sur la recherche médicale et la médecine reproductive. Les gouvernements de ces pays craignent que les accords éthiques établis à l'UNESCO risquent d'être en contradiction ou peu compatibles avec leur législation nationale. Toutefois, au cours de chaque débat intergouvernemental tenu à l'UNESCO, il a été souligné qu'une organisation dont 192 États sont membres a forcément un rôle à jouer, car la majorité de ses membres ne possèdent pas d'infrastructure éthique, ni même, souvent, de directives et législations adéquates. C'est pourquoi les pays les moins développés désirent que des cadres internationaux soient créés pour répondre à leurs besoins d'une orientation normative qui leur permettrait d'avoir la certitude que

des principes éthiques existent au niveau mondial et que des standards semblables soient utilisés partout dans le monde.

C'est dans ce contexte qu'en octobre 2003 et à la suite d'une étude de faisabilité du CIB, l'UNESCO a été mandatée par ses États membres pour préparer une déclaration fondée sur les principes fondamentaux de la bioéthique. Le 19 octobre 2005, après deux années de travail intense, ces États membres ont adopté, de manière unanime et par acclamation, la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme*, affirmant ainsi solennellement l'engagement de la communauté internationale à respecter un certain nombre de principes universels concernant maintenant le développement de l'humanité dans son ensemble (UNESCO, 2006c). Auparavant, les États membres de l'UNESCO avaient adopté ces instruments normatifs pour encadrer le domaine plus spécialisé de la génétique que sont la *Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme* (1997) et la *Déclaration internationale sur les données génétiques humaines* (2003).

LE RENFORCEMENT DES CAPACITÉS

Ce programme de l'UNESCO vise à identifier les questions éthiques compatibles avec les diverses régions du monde afin de déterminer et mettre en œuvre les stratégies appropriées destinées à la fois à encourager la réflexion éthique aux niveaux des régions et des sous-régions et à renforcer les capacités nationales et la coopération internationale dans le domaine éthique. Pour que ces efforts soient fructueux, il est essentiel de tenir compte des traditions juridiques, culturelles et religieuses de chacun des États membres. Toutefois, établir des normes n'est qu'un premier pas pour atteindre les objectifs de ce programme. Les déclarations adoptées resteront lettres mortes tant que leur mise en place ne sera pas effective dans chaque État membre.

Néanmoins, les infrastructures des États membres sont extrêmement hétérogènes – différant d'un pays à l'autre, reflétant ainsi une grande diversité d'expertises, de programmes éducatifs, de législation et de comités d'éthique – quand bien même elles existent. Cette hétérogénéité signifie aussi que les débats éthiques ne donnent souvent de résultats que dans les pays développés, les plus riches. Si l'on prend l'exemple des publications scientifiques traitant de la bioéthique, la contribution des chercheurs des pays en développement y est assez faible (Borry *et al.*, 2005). L'UNESCO fait d'importants efforts pour aider les États membres à créer et renforcer leurs infrastructures d'éthique, en leur fournissant

notamment des informations factuelles, en promouvant l'enseignement de l'éthique et, enfin, en créant des comités de (bio)éthique.

L'observatoire mondial d'éthique (GEObs)

L'Observatoire mondial d'éthique (GEObs) a été créé en décembre 2005 (www.unesco.org/shs/ehics/geobs) afin de mettre à disposition des États membres les outils adéquats pour faire face aux nouveaux défis éthiques posés par les sciences et les technologies. En son état actuel, GEObs propose trois banques de données. La première (le « Who's who de l'éthique ») propose des informations sur les experts appartenant à différents domaines de l'éthique. Un questionnaire a ainsi été envoyé à des experts de toutes les régions du monde. Cette base de données permet maintenant de contacter des experts en fonction des pays, des domaines d'expertise, de leur expérience et de mots-clés. Une autre banque de données comprend des informations sur des institutions telles que des comités d'éthique (aux niveaux local, national, régional et international), départements et centres d'éthique, associations et sociétés d'éthique. Cette banque, comme les deux autres, couvrira tous les secteurs de l'éthique appliquée, y compris la bioéthique, l'éthique des personnels soignants, ainsi que la loi et l'éthique, les sciences sociales et l'éthique, l'éthique de la science, l'éthique de l'environnement et l'éthique de l'ingénierie. Cette base fournira aussi, le moment venu, toutes ces informations dans les six langues officielles de l'UNESCO. La troisième banque décrit les différents programmes d'éducation en éthique proposés par le programme d'éducation éthique présenté plus loin. Depuis la création de GEObs, le nombre de données collectées s'est progressivement accru, permettant ainsi une meilleure évaluation de l'expertise disponible dans plusieurs États membres.

L'UNESCO se concentre maintenant sur la mise en place d'une quatrième banque de données qui fournira des informations sur la législation, les directives et les grandes orientations de l'éthique des sciences et des technologies développées par les États membres. Cette banque ne mettra pas simplement à disposition les textes de telles directives mais, avant et par-dessus tout, identifiera les structures, l'organisation et les contenus pouvant servir d'exemples à d'autres pays réfléchissant à la mise en place d'une juridiction et de règles éthiques, notamment celles relatives à la recherche sur des êtres humains, ou encore les principes éthiques de la science en général. Afin que ces informations puissent utilement guider la mise en place de telles législations, cette banque de

données proposera des résumés ou des extraits caractérisant la législation concernée. Une équipe de juristes experts examine actuellement comment comparer, du point de vue international, les législations existantes et elle en développe la méthodologie.

Le programme d'éducation éthique

le cadre d'action élaboré pendant la Conférence mondiale sur la science et l'utilisation du savoir scientifique, tenue à Budapest, stipule que l'éthique et la responsabilité des scientifiques devraient faire intégralement partie de leur éducation et de leur formation et que ces derniers devraient également être encouragés à respecter les principes éthiques fondamentaux et les responsabilités inhérentes à la science – et à y adhérer (Conférence mondiale sur la science, 1999). En 2002, la Division de l'éthique des sciences et des technologies a organisé avec la COMEST un groupe de travail sur l'enseignement de l'éthique chargé d'examiner comment l'éthique et la responsabilité devraient être intégrées à la formation scientifique. Ce groupe de travail a fourni un rapport sur l'enseignement de l'éthique où sont analysés les programmes existants, ainsi que leurs structures et contenus, et qui propose un curriculum conseillant de manière détaillée comment intégrer l'éthique, l'histoire, la philosophie et les effets de la science sur la culture (COMEST, 2003*b*) dans l'éducation scientifique. Ce rapport constitue la base du programme d'éducation éthique lancé par l'UNESCO en 2004.

Pendant la 32^e Conférence générale de l'UNESCO (2003), de nombreux États membres ont exprimé le désir de créer et soutenir des programmes d'enseignement de l'éthique, non seulement en bioéthique, mais encore dans tous les enseignements scientifiques et professionnels. L'enseignement de l'éthique diffère considérablement d'une région et d'un pays à l'autre, car il traite de questions morales localement pertinentes. La première étape consiste à collecter des données sur l'enseignement de l'éthique. Afin de créer une banque de données sur les enseignements de l'éthique déjà existants, des formulaires standardisés en proposent maintenant une description de manière à ce que chacun puisse être étudié en détail et faciliter ainsi l'analyse et la comparaison des différents programmes. À l'intérieur d'un même groupe de pays, des experts ont été identifiés dans différentes universités. Ces experts sont invités à prendre part à des réunions régionales et à fournir à l'avance des informations sur leurs enseignements, puis à les retourner pour

être discutées pendant ces réunions. Ce type de réunion leur permet de se faire une première opinion des programmes que leurs collègues enseignent. Les informations fournies peuvent alors être clarifiées et discutées – et les difficultés rencontrées, identifiées et débattues entre collègues. Une fois ces informations réunies et analysées, l'étape suivante consiste à explorer les futurs besoins et voir comment l'UNESCO peut contribuer à promouvoir l'enseignement de l'éthique. C'est ainsi que des réunions d'experts se sont tenues à Budapest (octobre 2004), Moscou (janvier 2005) et Split (novembre 2005). Une centaine de programmes d'enseignement de l'éthique ont ainsi été validés et intégrés à la banque de données de l'Observatoire mondial d'éthique. D'autres réunions ont été organisées, en 2006-2007, en Asie et dans la région arabe. La vulnérabilité des programmes de l'enseignement de l'éthique est bien connue. Alors que les responsables de ces enseignements font généralement preuve d'un réel enthousiasme, ces programmes se caractérisent par l'absence d'une solide base institutionnelle et d'un quelconque effort pour créer de manière systématique de futures générations de professeurs d'éthique. Un cours pilote de formation de professeurs d'éthique, organisé par l'UNESCO et la chaire UNESCO de bioéthique à Haïfa (Israël), a été créé pour remédier à cette situation et s'est tenu à Bucarest en novembre 2006. Le manque de coopération entre les nations est un autre sujet d'étonnement. La coopération d'enseignants expérimentés dans leurs pays voisins pourrait stimuler la création de programmes qui auraient un impact et une viabilité plus importants. Toutefois, il reste encore beaucoup à faire pour mieux sensibiliser les enseignants et stimuler leur volonté de travailler ensemble dans ce domaine.

Le Comité consultatif d'experts sur l'enseignement de l'éthique constitue une autre dimension du programme d'éducation éthique. Composé de membres du CIB et de la COMEST, ainsi que de représentants de la chaire UNESCO de bioéthique et de l'Académie des sciences pour le monde en développement, ce comité *ad hoc* assiste l'UNESCO dans le domaine de l'enseignement de l'éthique. L'un de ses premiers projets est de rédiger une proposition pour créer un cursus de bioéthique fondé sur la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* adoptée pendant la Conférence générale de l'UNESCO en 2005. À la suite de cette proposition, des moyens multimédias seront produits en vue de mieux aider les universitaires désireux d'établir des programmes d'enseignement de la bioéthique dans diverses régions et contextes culturels. À l'avenir, des efforts analogues seront déployés

pour d'autres domaines de l'éthique appliquée, notamment l'éthique de l'environnement, des sciences et de l'ingénierie (dont GEObs propose déjà des exemples).

Les comités d'assistance en bioéthique

La *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* plaide en faveur de la création de comités d'éthique indépendants, multidisciplinaires et pluralistes aux niveaux national, régional, local ou institutionnel. Ils visent à stimuler l'échange des idées et des informations, soutenir les prises de décision, créer les outils nécessaires pour établir des normes et renforcer la coordination et les contacts entre les experts et les institutions, notamment grâce aux banques de données. Ces comités renforcent l'action de l'UNESCO en tant que centre international d'échange d'information sur les questions éthiques. De plus, ces comités d'éthique sont d'importants intermédiaires pour favoriser la mise en place des instruments normatifs adoptés par les États membres. Bien que de nombreux pays aient maintenant acquis une certaine expérience des comités de bioéthique à divers niveaux gouvernementaux, la majorité des États membres n'en possède pas encore. Afin d'instaurer une meilleure équité, l'UNESCO a créé un programme destiné à soutenir l'établissement et la mise en œuvre de comités d'assistance en bioéthique (*Assisting Bioethics Committees, ABC*). Une collection de guides pratiques explique comment créer ce genre de comité et en organiser ensuite le fonctionnement. De nouvelles publications diffuseront les sujets qui seront enseignés aux membres de ces comités, ainsi qu'aux publics qu'ils veulent atteindre. Les groupes de travail constitués de membres de comités existant déjà dans les États membres aideront les pays en train d'en créer. Ces groupes offriront aux membres des nouveaux comités une formation aux modalités et procédures, ainsi qu'à l'analyse éthique. Les activités des comités d'éthique établis au cours de ce processus, qu'il s'agisse de comités spécialisés en bioéthique ou travaillant sur l'éthique générale (c'est-à-dire tous les secteurs concernés par l'éthique des sciences et des technologies), dépendront des besoins spécifiques des pays concernés.

LA SENSIBILISATION À L'ÉTHIQUE

L'UNESCO s'emploie à favoriser une meilleure compréhension des questions éthiques majeures soulevées par les sciences et les technologies, et elle soutient l'analyse et la discussion de ces questions aux

niveaux nationaux, régionaux et internationaux. Une part essentielle de son travail consiste à sensibiliser l'opinion publique en stimulant les débats publics. C'est très important pour deux raisons. Tout d'abord, l'éthique intéresse les pouvoirs publics en raison de leurs responsabilités. L'éthique a pris place dans les agendas nationaux et internationaux à cause de l'inquiétude et des discussions publiques concernant le clonage et la recherche impliquant des êtres humains, la transplantation d'organes et le réchauffement planétaire. L'éthique n'est désormais plus un sujet de préoccupation des scientifiques, des ingénieurs ou des professionnels de la santé ; ce n'est plus le domaine réservé des experts scientifiques, mais un sujet intéressant également le grand public. Ce développement illustre à quel point la science est d'abord et avant tout une entreprise publique, une activité sociale et un bien culturel. Ensuite, les progrès scientifiques affectent souvent toutes les populations ou, du moins, ils en ont le potentiel. Cela apparaît clairement dans la recherche médicale qui dépend de manière croissante de la coopération de nombreux patients et volontaires en bonne santé se soumettant à des expérimentations souvent à l'échelle internationale. Étant donné l'impact (potentiel) de la science et de la recherche, un équilibre devrait être établi entre, d'une part, les intérêts des scientifiques et des chercheurs et, d'autre part, ceux des sujets de la recherche – précisément parce que les droits et les libertés de tous les citoyens peuvent être soumis à certains risques par les travaux des premiers. Les débats publics et la sensibilisation du grand public sont donc essentiels pour que les sciences et les technologies progressent dans un cadre éthique où le respect de la dignité humaine et des droits de l'homme est de la plus haute importance. Les scientifiques conscients de leurs responsabilités envers la société tiennent compte des effets que leurs travaux peuvent avoir sur elle et ils prennent les précautions nécessaires pour assurer, entre autres, la protection de l'environnement, la promotion de la justice et la prévention des accidents et risques biologiques.

C'est dans ce but que la Division de l'éthique des sciences et des technologies de l'UNESCO organise actuellement une série de conférences thématiques. Connues sous le titre de « L'éthique autour du monde », ces conférences sont conçues pour disséminer l'information et promouvoir l'interaction entre experts nationaux et internationaux, ainsi que leur mise en réseaux. En stimulant les débats aux niveaux nationaux et internationaux, cette Division vise à améliorer la participation de la société civile. Ces conférences sont organisées conjointement avec les

commissions nationales de l'UNESCO, les bureaux de l'UNESCO auprès des pays et les centres universitaires ou de recherche. Elles comprennent habituellement une ou deux communications présentées par des membres du CIB ou de la COMEST. Une analyse et un débat suivent, centrés sur les sujets intéressant spécifiquement le pays où la conférence se tient. Au cours des deux dernières années, plusieurs de ces conférences se sont tenues aux Pays-Bas, dans la République islamique d'Iran, en Lituanie, au Mexique, en Argentine, dans la Fédération de Russie, au Portugal, en Turquie, dans la République de Corée, en Indonésie, en Chine, en Estonie, aux Philippines, en Nouvelle-Zélande et au Pérou.

La sensibilisation du public peut aussi être stimulée par des publications. L'UNESCO a publié une brochure sur l'éthique et le clonage humain dans ses six langues officielles : anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe (UNESCO, 2005*b*). Une brochure analogue sur l'éthique et la nanotechnologie vient de paraître (UNESCO, 2006*b*).

Le Prix Avicenne d'éthique scientifique constitue un autre moyen de sensibilisation à l'éthique. Créé en 2002 par l'UNESCO, à l'initiative de la République islamique d'Iran, ce prix est décerné tous les deux ans pour récompenser des individus ou des groupes ayant effectué une recherche de haute qualité dans le domaine de l'éthique des sciences et des technologies. Ce prix porte le nom d'Abu Ali al-Husain ibn Abdallah ibn Sina, également connu sous son nom latin d'Avicenne, l'un des plus grands scientifiques, philosophes et médecins des x^e et xi^e siècles (UNESCO, 2004). Le lauréat de ce prix reçoit une médaille d'or à l'effigie d'Avicenne, la somme de 10 000 dollars (\$E.-U.) et il est invité à visiter l'Iran pendant une semaine au cours de laquelle il donne des conférences à des universitaires. Les candidats sont proposés par les États membres et les ONG internationales en relations officielles avec l'UNESCO dont le Directeur général désigne ensuite le gagnant sur la recommandation d'un jury international indépendant. Margaret A. Somerville, en 2004, et Abdallah Daar, en 2006, ont été les premiers lauréats du Prix Avicenne.

L'ÉTHIQUE ET LES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

Les progrès techniques réalisés au cours des derniers siècles ont modifié de manière importante la condition humaine. Par exemple, la médecine et la technologie modernes sont devenues si intriquées que le médecin est devenu le prototype de l'homme technologique. En même temps,

il semble que la technologie et les changements qu'elle entraîne dans les soins de santé, en particulier dans la relation entre le médecin et le patient, sont aussi devenus aujourd'hui la source de nombreuses préoccupations éthiques concernant les soins de santé. Le nombre croissant de débats publics sur les utilisations théoriques et pratiques de la technologie, ainsi que les différends entre points de vue et valeurs concernant l'existence humaine impliquée dans les jugements sur les innovations scientifiques et techniques, ont fait de la bioéthique une discipline à part entière et un sujet de débats publics et politiques. C'est pourquoi l'UNESCO a lancé un programme de bioéthique et d'éthique des sciences et des technologies en créant le CIB et la COMEST.

Depuis les années 1970, les nouvelles technologies ont nécessairement donné lieu à un nouveau type d'évaluation des technologies. Les coûts croissants des technologies sont à l'origine de la création des agences et des procédures d'évaluation dans de nombreux pays. D'emblée, il est clairement apparu que l'évaluation des technologies ne peut se fonder sur une expertise technique et économique seulement, mais qu'elle doit aussi identifier des principes normatifs opératifs et donc rendre explicite ce qui n'était auparavant qu'implicite – par exemple, les choix prioritaires concernant les soins de santé. D'autre part, il est évident que, dans la pratique quotidienne, l'éthique ne joue qu'un rôle mineur dans les études évaluant les technologies concernées. C'est bien regrettable, car l'évaluation des technologies peut contribuer à examiner les questions éthiques que le développement de nouvelles techniques peut faire surgir. Au lieu d'attendre que ces questions émergent, il serait plus avantageux, pour le progrès scientifique et les orientations à prendre, d'en avoir une approche prospective, de les identifier et les discuter en amont. L'évaluation des technologies semble osciller entre deux pôles : d'une part, une conception étroite, centrée sur leur efficacité, leur sécurité et leurs effets économiques et, d'autre part, une conception large, tenant compte de leurs conséquences sociales et éthiques. La conception étroite domine les pratiques actuelles, bien que de nombreux experts plaident en faveur d'une approche plus intégrale. La question demeure de trouver comment mieux articuler le rôle de l'éthique dans l'évaluation des technologies.

L'éthique étant intrinsèquement indissociable de l'évaluation des technologies, il est donc urgent de repenser la manière dont elle est conçue dans les soins de santé et de la compléter d'une méthode d'évaluation exhaustive (revenant ainsi à la notion plus large des débuts).

Cette évaluation ne se limiterait pas à des questions de sécurité, d'efficacité et de rentabilité, mais examinerait également les jugements de valeur que mettent en jeu les recommandations. Elle déterminerait si et pourquoi ces recommandations devraient être normatives au lieu d'être uniquement scientifiques. Toutefois, avant de reconsidérer le concept d'évaluation des technologies, il est important d'examiner pourquoi l'éthique est jusqu'à ce jour souvent absente des évaluations technologiques. En y regardant de plus près, deux raisons au moins peuvent être discernées : tout d'abord, la recherche actuelle portant sur cette évaluation est conceptualisée de manière telle qu'elle se démarque des questions éthiques. Ensuite, l'éthique appliquée est elle-même souvent considérée comme une variété de la technologie – visant à résoudre ou, du moins, à « adoucir » les conséquences morales de l'utilisation des technologies médicales.

Dans le premier cas, la ligne séparant l'éthique de l'évaluation des technologies dépend de la manière dont la technologie est considérée en tant que valeur neutre ou chargée de valeur. Si elle est tenue pour être de valeur neutre, alors la technologie ne peut être ni bonne ni mauvaise, mais un simple moyen. Ce point de vue semble aujourd'hui prédominer l'évaluation des technologies. Ainsi, il est maintenant courant de distinguer les effets directs de la technologie de ses effets indirects, ou encore l'évaluation étroite des technologies d'une autre plus large. Les dimensions morales des nouvelles technologies étaient auparavant largement considérées comme des « conséquences de second ordre » qui se manifestaient au niveau des pouvoirs publics au moment où il était demandé que les pratiques des soins de santé respectent les indications fournies par les études d'évaluation. Cette conception repose sur le principe suivant lequel l'éthique ne faisant pas partie des principaux processus de l'évaluation, les valeurs n'étaient pas mises en relation avec la technologie elle-même, mais seulement avec ses applications.

Quant à la seconde raison, la difficile relation entre l'éthique et l'évaluation des technologies est liée à la nature même de l'éthique. La bioéthique, en particulier, s'est développée en une discipline autonome destinée à améliorer les pratiques des soins sanitaires, mais elle a aussi pris une dimension technologique. Le modèle rationnel de la réflexion morale y prévaut souvent, en reposant sur le concept de la rationalité technologique et appliquant un ensemble limité de principes moraux (en particulier le principe du respect de l'autonomie). Pour cette approche, la bioéthique est une technologie sophistiquée

destinée à gérer et contrôler un certain nombre de problèmes. Selon des philosophes tels que Jürgen Habermas, Michel Foucault et Ivan Illich, la technologie nous confronte à des problèmes moraux surtout parce que l'évaluation des technologies pénètre, domine et même « colonise » nos vies et le monde. Les solutions ne peuvent venir d'une éthique qui est elle-même techniquement orientée. En effet, lorsque l'éthique appliquée traite de problèmes moraux de la même manière que, disons, l'ingénierie – appliquant alors techniquement des principes à des cas et des dilemmes –, elle s'avère n'être qu'une autre manifestation du même problème de fond. Elle se trouve donc alors prisonnière d'un cercle vicieux, si l'on peut dire.

Il est donc nécessaire de repositionner l'éthique si l'on veut analyser et comprendre la dimension morale de la manière dont les technologies sont développées, testées et utilisées dans la société d'aujourd'hui. À cette fin, deux moyens permettent que l'éthique apporte une contribution positive à l'évaluation des technologies.

La première concerne une catégorie de questions morales apparues au sein même d'une technologie particulière. Les débats sur le statut moral de l'embryon dans la technologie des cellules souches (examiner si l'ovule fertilisé ou « activé » est semblable à l'embryon « traditionnel » ou différent de lui), ou encore sur les conditions dans lesquelles se font les dons de gamètes, en sont des exemples. Des questions de ce type restent dans le cadre de la technologie, car elles l'acceptent dans sa forme courante et cherchent à définir comment utiliser la technologie de manière responsable et appropriée. Ce genre de question est habituellement traité dans les études d'évaluation des technologies – du moins dans celles qui comportent une analyse éthique. Le cadre théorique de ces études provient de la conception actuelle de l'« éthique appliquée » qui comprend, à l'instar de l'application des théories éthiques générales, des principes et des règles destinés à traiter des problèmes spécifiques se manifestant dans l'organisation des soins de santé, dans la recherche et les pratiques thérapeutiques. De telles études visent à analyser ces problèmes et offrir des solutions moralement justifiées. L'instrument essentiel de cette approche est un ensemble de principes moraux, trois ou quatre habituellement : le respect de l'autonomie, les avantages, les inconvénients (parfois inclus dans la même catégorie que les avantages) et la justice. Par comparaison, les quinze principes de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* adoptée en 2005 par les États membres de l'UNESCO la rendent bien plus complète.

En tant que généralisations normatives, ces principes constituent les fondements des directives et des règles éthiques destinées aux actions humaines, ainsi que les moyens par lesquels justifier des prescriptions et des évaluations particulières de ces actions. Ils présentent l'avantage de pouvoir être défendus sous différentes perspectives théoriques morales. Ils fournissent un cadre analytique, un moyen universel permettant de clarifier et résoudre des questions morales qui peuvent se manifester au sujet d'une technologie particulière, alors que la seule évaluation des technologies ne peut le faire.

De plus, l'éthique contribue à l'évaluation des technologies en allant *au-delà* du cadre de la technologie elle-même. L'éthique se concentre alors sur une seconde catégorie de questions morales concernant la technologie elle-même. Ici, l'analyse se concentre sur la question de savoir si une technologie en tant que telle se justifie à la lumière de valeurs morales. Ce type d'analyse éthique ne considère pas une technologie comme suffisante en elle-même, mais s'appuie sur une perspective critique, présumant que les technologies ne sont pas de valeur neutre mais véhiculent des valeurs. Les technologies expriment des valeurs, celles de la recherche de la connaissance, de leur capacité à provoquer ou atténuer des souffrances. Toutefois, ces valeurs sont souvent implicites, et non explicites. La recherche éthique commence maintenant à les utiliser pour lancer le débat sur des valeurs motivant (ou non) la société. Ce genre de recherche se concentre sur les valeurs sous-jacentes ou impliquées dans le développement de la technologie elle-même. Par exemple, des études de ce type se fondent simplement sur l'hypothèse selon laquelle les progrès des techniques de transplantation sont bénéfiques, alors qu'au contraire elles remettent en question des notions spécifiques (notamment l'intégrité personnelle, l'altruisme, la mort et le corps) associées à celles issues des nouvelles technologies. Ces études examinent notamment de manière critique la notion tacite de « propriété du corps », notion selon laquelle le principe d'autonomie, tout en facilitant le don d'organe, réitère et renforce la notion dualiste traditionnelle de la personne humaine en tant que sujet autonome propriétaire d'un corps matériel. Ce type d'analyse explore aussi la récente expansion des techniques de transplantation cellulaire et génétique. Elle attire l'attention sur les demandes de perfectibilité (« amélioration ») et d'immortalité souvent implicites dans les étonnants progrès des techniques des cellules souches, et elle met en relation ces revendications avec un ensemble de connaissances philosophiques et, parfois, utopiques. La

méthodologie suivie dans ces études est autant historique que synthétique. Elles visent à fournir une perspective à la fois synchronique et diachronique : les valeurs comprises dans les techniques actuelles sont expliquées en relation avec des valeurs comparables dans l'histoire, mais également avec les progrès d'autres disciplines scientifiques, dépassant ainsi le cadre des disciplines actuelles. Ce genre de recherche soutient l'hypothèse selon laquelle l'éthique consiste d'abord et avant tout en l'effort philosophique de nous comprendre nous-mêmes et notre existence en termes de désirable ou non, supportable ou répréhensible, bon ou mauvais. Cette approche de l'éthique offre un riche éventail de valeurs pertinentes qui doivent être prises en considération dans toute décision politique responsable, et elle contribue ainsi largement à l'évaluation des technologies.

L'écart actuel entre l'éthique et l'évaluation des technologies est remarquable depuis que cette dernière a émergé des inquiétudes normatives suscitées par l'introduction non contrôlée de nouvelles technologies dans des différents contextes sociaux. Dans la pratique, l'évaluation des technologies est restée limitée à l'analyse économique. Toutefois, une approche plus large de l'évaluation des technologies sera nécessaire pour centrer l'attention sur les questions éthiques, pour faciliter les orientations à prendre et pour répondre aux inquiétudes sociales et éthiques dès les premiers stades de nouveaux développements technologiques. Cette approche prospective devra également tenir compte de la dimension internationale de l'évaluation des technologies. Alors que les nouvelles technologies tendent à émerger dans les pays les plus développés, leurs effets sont, tôt ou tard, généralement ressentis dans tous les pays, quel que soit leur niveau de développement.

LES NANOTECHNOLOGIES

La nanotechnologie est l'un des domaines technologiques connaissant le développement le plus rapide aujourd'hui. Ses nombreuses applications sont prometteuses, notamment en médecine, dans l'industrie et la communication. D'immenses bénéfices sont espérés dans divers secteurs, y compris le développement de médicaments, les technologies de l'information et de la communication (TIC), la décontamination de l'eau et la production de matériaux plus solides et légers. De nombreux gouvernements et entreprises investissent rapidement d'énormes sommes d'argent dans les nanotechnologies. Néanmoins, diverses inquiétudes s'expriment au sujet de leurs développements

présents et à venir. Les effets des nouveaux nanomatériaux sur la santé humaine et l'environnement demeurent incertains, notamment ceux concernant le type et l'étendue des applications de ces nouvelles technologies qui donnent ainsi matière à discussion sur l'adéquation des directives concernant actuellement ces nouveaux progrès.

Le terme de « nanotechnologie » désigne différentes choses. En octobre 2006, une recherche sur Internet produisait 1 850 000 réponses pour les mots « nanotechnologie » et « définition ». Le préfixe « nano » vient du mot grec signifiant « nain ». Ce terme désigne une unité de longueur physique : un nanomètre (nm) est égal à un milliardième de mètre. Un seul cheveu humain mesure environ 80 000 nm de largeur ; une érythrocyte ou globule rouge a une largeur approximative de 7 000 nm et les atomes ont une taille inférieure à un nanomètre. Le terme de « nanotechnologie » a été forgé en 1974 par Norio Taniguchi, de l'université des Sciences de Tokyo, afin de désigner une technique de production à l'échelle du nanomètre. Cette technologie comprend des processus de séparation, consolidation et déformation de matériaux à l'aide d'un seul atome ou d'une seule molécule. La nanomesure se situe donc entre le monde subatomique et le monde matériel classique des cellules biologiques, des bactéries et des virus. À cette échelle, les propriétés des matériaux sont ou bien différentes, ou bien meilleures que lorsqu'ils ont plus grande taille. Aux États-Unis, le *21st Century Nanotechnology Research and Development Act* ou *Loi sur la recherche et le développement de la technologie au XXIe siècle* (US Congress, 2003) définit ainsi la nanotechnologie :

Le terme de « nanotechnologie » signifie que la science et la technologie permettront de comprendre, mesurer, manipuler et produire aux niveaux atomique, moléculaire et supramoléculaire, des matériaux, instruments et systèmes possédant une organisation, des propriétés et des fonctions moléculaires fondamentalement différentes.

Le rapport 2004 de la Société royale et de l'Académie royale d'ingénierie (*Royal Society and Royal Academy of Engineering*) du Royaume-Uni, intitulé *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties* (« Nanoscience et nanotechnologies : chances et incertitudes »), établit une distinction entre « nanoscience » et « nanotechnologie ». Il définit la nanoscience comme « l'étude des phénomènes et de la manipulation des matériaux aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaires où les propriétés diffèrent de manière importante de celles à plus grande échelle ». Par ailleurs, la nanotechnologie

est un terme utilisé pour désigner une si grande diversité d'outils, de techniques et d'applications potentielles qu'il est plus adéquat d'utiliser ce terme au pluriel. Les nanotechnologies sont définies comme « la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, moyens et systèmes en contrôlant la forme et la taille à l'échelle du nanomètre ». Cet ouvrage s'aligne sur cette définition et utilise donc souvent le terme de « nanotechnologie » au pluriel.

Les nanotechnologies ont donné lieu à diverses questions éthiques, comme cela a été souligné dans une précédente publication de l'UNESCO (UNESCO, 2006*b*). De même qu'au cours des récents développements des sciences et des technologies (notamment l'énergie nucléaire, la biotechnologie et les cellules souches embryonnaires), les nouvelles nanotechnologies risquent fort d'entraîner de vifs débats publics. Toutefois, dans le cas du développement des nanotechnologies qui en est encore à un stade précoce, nous bénéficions de la rare opportunité d'entamer une réflexion éthique prospective. Certains doutes se sont exprimés sur l'existence même de nouvelles questions éthiques ou de questions spécifiques soulevées par les nanotechnologies. Une autre opinion affirme qu'un nouveau domaine de l'éthique appliquée – la nanoéthique – est en train de voir le jour. Quoi qu'il en soit, le plus urgent est maintenant de reconnaître que diverses questions éthiques – nouvelles ou non – réclament notre attention (Khushf, 2004). Les futurs développements des nanotechnologies elles-mêmes permettront de définir si les questions éthiques qu'elles suscitent sont réellement nouvelles et s'il est justifié de parler d'une nouvelle sous-discipline de la nanoéthique.

Ici se justifie la distinction proposée dans la section précédente sur l'étendue des questions éthiques en relation avec de nouvelles technologies. Tout d'abord, ce problème concerne la catégorie des questions morales soulevées dans le cadre même de technologies spécifiques. Il s'agit des effets négatifs qu'elles pourraient avoir sur la santé, la sécurité et l'environnement. L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), par exemple, s'est efforcée pendant un certain temps de coordonner des méthodes d'évaluation des effets des nanomatériaux manufacturés sur la santé humaine et la sécurité environnementale. Ensuite, une autre catégorie de questions morales porte sur les technologies elles-mêmes et relie les nouvelles technologies aux valeurs éthiques en général. Cela soulève l'importante question concernant les effets à long terme des nanotechnologies sur la société

mondiale (Kearnes *et al.*, 2006 ; Stone et Wolfe, 2006). Déterminer quels en seront les bénéficiaires et quels en seront les perdants n'est pas évident. Les nanotechnologies présentent le danger d'accroître l'écart entre pays pauvres et pays riches et de créer une « nanodivision ». Ces questions vont bien au-delà des inquiétudes soulevées par l'évaluation des risques. Elles attirent l'attention sur la justice mondiale, l'éthique scientifique et les objectifs de l'innovation en sciences et technologies (UNESCO, 2006*b*).

LES NANOTECHNOLOGIES ET L'UNESCO

À la suite de la publication intitulée *The Ethics and Politics of Nanotechnology* ou « L'éthique et les orientations de la nanotechnologie » (UNESCO, 2006*b*), la COMEST a examiné le rôle que l'UNESCO, en tant qu'organisation intergouvernementale, peut jouer dans l'évaluation de ces technologies émergentes. Cette brochure témoigne des efforts de l'UNESCO pour fournir une information objective et exhaustive sur les dimensions éthiques de la nanotechnologie. Sans prendre position, cette publication permet à tous les États membres de disposer d'explications sur ce qu'est la nanotechnologie et elle indique un certain nombre de questions éthiques soulevées par ses progrès et ses applications (ce texte n'est actuellement disponible qu'en anglais ; les traductions dans les autres langues officielles des Nations Unies sont en cours).

En 2005, un groupe *ad hoc* d'experts (d'Allemagne, du Brésil, du Canada, de la Chine, du Japon, de la Nouvelle-Zélande, des Pays-Bas et de la République de Corée) a été réuni pour étudier et analyser les aspects éthiques de la nanotechnologie. Ces experts se sont rencontrés au siège de l'UNESCO, à Paris, les 5 et 6 juillet, puis les 6 et 7 décembre de la même année. Ce groupe a travaillé en suivant une double stratégie. La première phase a consisté à réunir des informations et des propositions destinées à rédiger un document d'orientation pour l'UNESCO sur les diverses actions internationales qu'elle pourrait entreprendre. Ce document de travail en propose quatre : sensibilisation, éducation, recherche et orientation. Actuellement examiné par la COMEST, ce document a donné lieu à d'autres consultations et délibérations au cours de la cinquième session ordinaire de la COMEST qui s'est tenue à Dakar (Sénégal), en décembre 2006.

Il est important de définir les orientations nécessaires au niveau international. Le développement des nanotechnologies peut-il être

dirigé vers des objectifs sociaux et environnementaux plus larges est une question qui doit être posée. Les réponses à cette question sont importantes pour la communauté internationale dans sa totalité. Comment les gouvernements peuvent-ils influencer la « nanodivision » est une autre question importante. De nombreux gouvernements sont en train d'examiner ces questions et d'autres concomitantes, et beaucoup travaillent sur les orientations nécessaires (nationales ou régionales). Des recommandations existent dans différents rapports établis par des scientifiques, des pouvoirs publics et des organes consultatifs (Royal Society & Royal Academy of Engineers, 2004 ; Foster, 2006). Ces recommandations comprennent les suivantes :

Des programmes de recherche interdisciplinaire devraient examiner les questions sociales et éthiques pouvant émerger du développement des nanotechnologies.

La formation des chercheurs actuels et futurs devrait comprendre une réflexion sur les implications éthiques et sociales des nanotechnologies.

Le grand public devrait être mieux informé sur les implications de ces technologies et plus impliqué dans les débats les concernant.

Des organes de régulation et des organes consultatifs devraient développer des mécanismes destinés à réguler et analyser le développement de ces technologies (notamment dans les secteurs de la santé, de la sécurité et des accidents environnementaux), à rendre les résultats de leurs travaux publiquement disponibles et à prendre en considération toute absence de régulation.

L'éthique peut contribuer à évaluer les technologies médicales de deux façons : d'une part, en dressant une liste des questions morales pertinentes soulevées dans le cadre même de technologies spécifiques et, d'autre part, en dépassant ce cadre afin de voir comment redéfinir les problèmes pour explorer les interrelations des questions techniques et non techniques, et pour examiner le cadre dans lequel la technologie est analysée, c'est-à-dire chercher à rendre explicites les principes implicites à partir desquels ces analyses sont souvent conduites – principes parmi lesquels la priorité donnée aux aspects économiques et la valorisation de la rationalité fonctionnelle, essentielle pour le monde développé, ne sont pas les moins importantes.

L'UNESCO peut jouer un rôle décisif en promouvant et facilitant entre les pays l'échange d'informations sur les nouvelles technologies, ainsi qu'en orientant l'évaluation de ces dernières afin d'assurer qu'elles

prennent bien en considération des valeurs fondamentales pour certains pays et régions, tout en respectant les valeurs de la communauté des nations dans son ensemble. L'examen de l'éthique des nanotechnologies est en accord avec le mandat éthique de l'UNESCO. En priorité, les questions éthiques concernant les nanotechnologies devraient être identifiées et analysées de manière à ce que le grand public, les spécialistes et les pouvoirs publics soient bien conscients des implications des nouvelles nanotechnologies. Leur développement étant très rapide, une approche prospective ou anticipative est nécessaire. Au lieu d'attendre que le public exprime des craintes et que des débats moraux s'élèvent, des comités internationaux tels que le Comité international de bioéthique (CIB) et la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST) doivent orienter de manière continue les bénéfices et les inconvénients possibles des technologies nouvelles et émergentes. Ici aussi, l'UNESCO peut jouer un rôle important en promouvant, d'un point de vue mondial et à niveau international, le dialogue entre les parties intéressées et en faisant des recommandations aux pouvoirs publics qui seront confrontés aux défis éthiques de ces technologies émergentes en pleine évolution.

CET OUVRAGE

Cet ouvrage résulte du travail du groupe d'experts de l'UNESCO mentionné plus haut. Il leur a été demandé de répondre à deux questions. Tout d'abord, quel est l'état actuel des nanotechnologies et quelles sont les questions éthiques en relation avec elles ? Ensuite, quelles chances l'action internationale a-t-elle de réussir à ce sujet ? Des documents de travail ont été analysés et discutés pendant leurs réunions. L'information et les analyses fournies dans cet ouvrage couvrent trois grands domaines. Sa première partie passe en revue l'état actuel de ce domaine scientifique. Spangler (*chapitre 1*) et Liu (*chapitre 2*) expliquent ce que sont les nanotechnologies tout en donnant plusieurs exemples de la recherche actuelle, des tendances de leur développement et de leurs applications pratiques possibles. La deuxième partie traite des questions éthiques. Schummer (*chapitre 3*) propose un vaste inventaire des questions éthiques que les nanotechnologies peuvent potentiellement soulever, tandis que Gordijn (*chapitre 4*) et Evans (*chapitre 5*) concentrent leur réflexion sur des domaines spécifiques de la médecine et des soins de santé. La troisième partie traite des pouvoirs publics. Court *et al.* (*chapitre 6*) expliquent la pertinence des nanotechnologies pour les

pays en développement. Choi (*chapitre 7*) indique comment le grand public peut participer au débat sur les nanotechnologies et comment les programmes éducatifs devraient être modifiés afin de mieux sensibiliser les scientifiques et les chercheurs sur les questions morales. La description que Jean *et al.* (*chapitre 8*) font des expériences de la Commission de l'éthique de la science et de la technologie (CEST) au Québec (Canada) illustre comment les pouvoirs publics peuvent commencer à résoudre les problèmes éthiques soulevés par ces technologies émergentes que sont les nanotechnologies.

BIBLIOGRAPHIE

- Borry, P. ; Schotsmans, P. ; Dierickx, K. 2005. "Developing countries and bioethical research". In : *New England Journal of Medicine*, Vol. 353, 852-853.
- COMEST. 2003a. *Proceedings Third Session*, 1-4 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil. Paris : UNESCO.
- . 2003b. *The Teaching of Ethics*. Paris : UNESCO.
- . 2004. *Best Ethical Practice in Water Use*. Paris : UNESCO.
- . 2005a. *The Precautionary Principle*. Paris : UNESCO.
- . 2005b. *Proceedings Fourth Session*, 23-25 March 2005, Bangkok, Thailand. Paris : UNESCO.
- Foster, L. E. (Ed.). 2006. *Nanotechnology: Science, Innovation and Opportunity*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.
- Kearnes, M. ; Macnaghten, P. ; Wilsdon, J. 2006. *Governing at the Nanoscale: People, Policies and Emerging Technologies*. London : DEMOS.
- Khushf, G. 2004. "The ethics of nanotechnology: Vision and values for a new generation of science and engineering", National Academy of Engineering, Ed. In : *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering*. 28-55. Washington, DC : The National Academies Press.
- Lenoir, N. 1997. "Are attitudes towards bioethics entering a new era?" In : *Journal of Medical Ethics*, Vol. 23, 69-70.
- Pompidou, A. 2000. *The Ethics of Space Policy*. Paris : UNESCO.
- The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. 29 July. London : The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (accès 22 décembre 2006)

- Sass, H.-M. 1991. "UNESCO Conference on Human Rights and Bioethics". In : *Kennedy Institute of Ethics Journal*, Vol. 1, 253-256.
- Stone, J. V. ; Wolfe, A. K. 2006. "Nanotechnology in society: Atlas in wonderland?" In : *Practising Anthropology*, Vol. 28, No. 2, 1-40.
- UNESCO. 1945. *Constitution of UNESCO*. Paris : UNESCO. http://www.icomos.org/unesco/unesco_constitution.html (accès 22 décembre 2006)
- . 1989. *25 C/Resolution 5.2*. Decision of the 25th session of the General Conference of UNESCO regarding "Philosophy, ethics and the life sciences".
- . 1991. *Science-Agenda Framework of Action*. World Conference of Science. Budapest : UNESCO.
- . 1993. *27 C/Resolution 5.15*. Decision of the 27th session of the General Conference of UNESCO regarding "Preparation of an international instrument for the protection of the human genome".
- . 2004. *Avicenna and the Ethics of Science and Technology Today*. Paris : UNESCO.
- . 2005a. *Guide 1: Establishing Bioethics Committees*. Paris : UNESCO.
- . 2005b. *Human Cloning: Ethical issues*. Paris : UNESCO.
- . 2006a. *Guide 2: Bioethics Committees at Work: Procedures and Policies*. Paris : UNESCO.
- . 2006b. *The Ethics and Politics of Nanotechnology*. Paris : UNESCO.
- . 2006c. *Universal Declaration on Bioethics and Human Rights*. Paris : UNESCO. http://portal.unesco.org/shs/en/file_download.php/46133e1f4691e4c6e57566763d474a4dBioethicsDeclaration_EN.pdf (accès 16 octobre 2006)
- US Congress. 2003. *21st Century Nanotechnology Research and Development Act*. Public Law No. 108-153. Washington, DC. <http://www.theorator.com/bills108/s189.html> (accès 16 octobre 2006)

Première partie

Évolution scientifique

Chapitre 1

ÉVOLUTION DES NANOTECHNOLOGIES

Margareth Spangler Andrade

La recherche en technologies à nanoéchelle connaît une croissance rapide dans le monde entier. Malgré le manque de stratégie, plusieurs sous-domaines améliorent la possibilité de construire des structures précises à l'échelle atomique. De grands espoirs dans leurs futures applications et la crainte des conséquences néfastes pour l'environnement et l'humanité que ces nouvelles technologies peuvent apporter divisent maintenant l'opinion publique.

Ce chapitre présente divers aspects de l'évolution actuelle des nanotechnologies : quand et pourquoi la nanoscience et la nanotechnologie ont capté l'attention des chercheurs, comment ce domaine évolue, son caractère multidisciplinaire, le rôle des scientifiques dans son développement et les conséquences de la recherche en nanotechnologie, ainsi que ses applications dans les pays en développement. L'objectif est de stimuler la discussion des questions qui, en l'état actuel de l'éthique et des nanotechnologies, peuvent se présenter et pour lesquelles il faut trouver des réponses.

LE « NANOMONDE »

Bien que la nanotechnologie soit encore très récente et que sa définition donne lieu à des controverses tout en changeant avec le temps, ce chapitre se réfère, de manière générale, à la définition adoptée dans l'introduction de cet ouvrage, c'est-à-dire « la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, moyens et systèmes en contrôlant la forme et la taille à l'échelle du nanomètre » (Royal

Society and Royal Academy of Engineering, 2004). Cette définition présente l'avantage d'inclure tous les stades les plus importants du développement de concept et du domaine de la nanotechnologie.

Bien que Richard P. Feynman ne mentionne ni le terme de « nano » ni celui de « nanotechnologie » dans sa célèbre conférence donnée en 1959 à l'Institut de technologie de Californie ou Caltech (Feynman, 1960), le concept de nanotechnologie n'en est pas moins présent. Il discuta alors en détail de la possibilité de réunir de minuscules objets et même de déplacer un à un des atomes ou des molécules afin de créer des matériaux possédant des qualités, tout à la fois différentes et étonnantes, permettant de concevoir des ordinateurs beaucoup plus rapides et même d'incroyables progrès dans le secteur sanitaire. « Ce dont je veux parler, dit-il, c'est du problème de la manipulation et du contrôle d'objets à une petite échelle. » (Feynman, 1960)

Si, selon certains, la conférence de Feynman n'a fait qu'inaugurer la recherche en nanotechnologie, des découvertes pertinentes existaient déjà auparavant, dès le XIX^e siècle, bien qu'elles n'y aient pas directement conduit (voir le tableau chronologique ci-dessous). D'autre part, l'on peut estimer que la phase inaugurale de cette nouvelle technologie a pris fin avec l'invention du microscope à effet tunnel (STM), en 1981, par Binnig et Rohrer. Depuis, le rythme auquel d'autres découvertes ont été faites n'a cessé de s'accélérer considérablement.

1857	1905	1932	1960	1981	1985
Michel Faraday découvre l'or colloïdal.	Albert Einstein explique l'existence des colloïdes.	Langmuir découvre les couches d'une molécule.	Feynman lance l'hypothèse d'un monde à la nanoéchelle.	Binnig et Rohrer inventent le microscope à effet tunnel.	Une nouvelle forme de carbone, le fullerène, est découverte.

Au cours des années 1970, les scientifiques se sont consacrés à l'étude de la croissance des couches minces afin de produire des matériaux destinés à l'électronique et à l'optique (Esaki et Tsu, 1970). Ils cherchaient à créer des puits quantiques – utilisés en optique électronique, comme les lasers et les photodétecteurs. Bien que le terme de « nanotechnologie » n'ait pas alors été utilisé, ce furent les premières nanostructures unidimensionnelles créées par des scientifiques. Ils utilisèrent la technique de l'épitaxie avancée, ou disposition cristalline orientée de couches de différents matériaux dont l'épaisseur n'atteint que quelques angstromes (1 angstrome = 0,0000000001 m). Dans les années 1980, l'évolution

de cette recherche conduisit aux fils quantiques – des nanostructures bidimensionnelles – et, pendant les années 1990, aux points quantiques (Gonzalez *et al.*, 2000), ainsi que, plus récemment, aux structures quantiques tridimensionnelles permettant d'étonnantes applications dans de nombreux domaines, depuis l'électronique et l'optique jusqu'à la médecine. Les points quantiques sont de très petites particules possédant des propriétés optiques intéressantes : elles absorbent la lumière blanche normale et, selon leur taille, émettent une gamme de couleurs vives. Cette propriété vient directement de la très petite taille de ces particules.

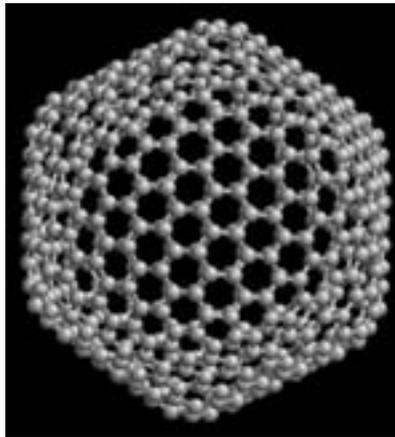
En fait, c'est un chercheur japonais, Norio Taniguchi, qui utilisa le premier le mot « nanotechnologie », terme qu'il inventa en 1974 pour désigner la production d'une structure à la nanoéchelle en réorganisant de la matière atome par atome, ou molécule par molécule (OED ou *oxydation enhanced diffusion*) (Taniguchi, 1974). Selon la notion qu'en avait Taniguchi, la nanotechnologie impliquait la miniaturisation descendante (*top-down*) qui était alors « considérée comme le dernier stade de l'ingénierie mécanique dont la production et les tolérances n'ont cessé depuis de gagner en précision tout au long de son histoire » (Budworth, 1996, p. 13). La miniaturisation descendante est la technique habituellement utilisée pour réorganiser la matière jusqu'à ce qu'un composant ou produit complet soit obtenu. Cette technique est aussi utilisée pour produire les puces microélectroniques.

Alors que la conférence de Feynman lançait un défi aux chercheurs dans de nombreux domaines, la nanotechnologie faisait irruption dans l'imagination populaire avec le livre d'Eric Drexler, *Engines of Creation* (« Machines à créer »). Inspiré par les idées de Feynman, Drexler récupéra le terme de « nanotechnologie » au milieu des années 1980 et lui donna la signification qu'il a aujourd'hui. Ses travaux ayant constitué une importante étape pour consolider cette nouvelle approche scientifique, Drexler est maintenant généralement considéré comme l'inventeur de ce terme. Son intérêt portait sur les capacités avancées qui étaient fondées sur les assembleurs moléculaires, des matériaux capables de guider des réactions chimiques en positionnant des molécules réactives avec une précision atomique. Ici, il s'agit d'une approche ascendante (*bottom-up*).

En 1985, le chimiste R. E. Smalley et ses collègues découvrirent une nouvelle forme de carbone qu'ils nommèrent les « fullerènes » en honneur de R. Buckminster Fuller et qui furent plus tard appelés aussi

buckyball ou *buckminster*. Ses propriétés sont complètement différentes des deux autres formes connues du carbone, le diamant et le graphite. Le fullerène est une molécule comprenant 60 atomes de carbone (*figure 1.1*).

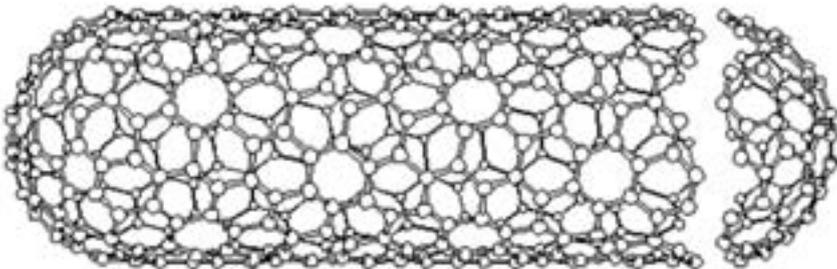
Figure 1.1.
Fullerene structure of carbon atoms



Source : <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>.

La découverte des fullerènes contribua à mettre en vedette le domaine de la nanotechnologie alors émergente, car elle impliquait de pouvoir fabriquer des produits à partir de molécules formatrices. Un nouveau développement de la recherche de Smalley s'ensuivit (Wang *et al.*, 2005), conduisant à la variante tubulaire du fullerène, les nanotubes de carbone (*figure 1.2*). Lorsque leur production atteint une perfection moléculaire, les fullerènes tubulaires offrent des propriétés électriques,

Figure 1.2. Nanotube de carbone



Source : R. Saito. <http://www.godunov.com/Bucky/nanotube.html>
Copyright (©) Tohoku University

thermiques et mécaniques révolutionnaires à l'échelle du nanomètre. Les chercheurs pensent que d'importantes nouvelles technologies seront développées dans les décennies à venir à partir des tubes, fibres et câbles de fullerènes. Il est aussi envisagé d'utiliser ces nanotubes pour transporter des médicaments dans le corps humain, ou encore pour renforcer des matériaux utilisés dans certaines parties des avions. Aujourd'hui, de nombreuses équipes de chercheurs dans le monde se consacrent au développement de la science des nanotubes, ainsi que des méthodes de leur production, purification, caractérisation et assemblage.

Les célèbres discussions entre Drexler et Smalley sur les possibilités d'applications techniques dans le nanomonde (Smalley, 2001) se sont centrées sur l'idée de créer un jour des nanomachines autorépliquantes. Malgré leurs divergences, ces deux scientifiques convinrent que la nanotechnologie entraînerait d'immenses progrès dans de nombreux domaines de la vie humaine.

Les écrits de deux auteurs, inspirés par les idées de Drexler, ont aussi influencé les scientifiques et l'opinion publique. Erik Viktor, un écrivain et graphiste belge talentueux, a réalisé des dessins fantastiques de nanorobots, ou *nanobots*, agissant dans le système sanguin pour y effectuer des tests et des diagnostics, ou encore pour soigner (Viktor, 2002). Le best-seller de Michael Crichton, *La Proie*, a généré la peur que des nanorobots autorépliquants deviennent incontrôlables (Crichton, 2002). Ces œuvres ont suscité à la fois de grands espoirs et une grande peur de l'inconnu devant l'élan sans limites que la nanotechnologie pourrait prendre.

LES MICROSCOPES À CHAMP PROCHE

Un autre bond en avant dans le développement de la nanotechnologie fut réalisé au cours des années 1980, avant la découverte des fullerènes, avec l'invention d'un nouveau type de microscope, le microscope à champ proche ou SPM. Les chercheurs d'IBM-Zurich ont démontré qu'il était finalement possible de « voir » les atomes et d'y accéder séparément. L'ancêtre de ce type de microscope, le microscope à effet tunnel ou STM conçu par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, devint célèbre lorsque Binnig, Rohrer, Gerber et Wiebel publièrent deux articles, maintenant classiques, dans *Physical Review Letters* (1982 et 1983), illustrés de l'image d'un modèle répétitif d'atomes connu sous le nom de « surface de silicène 7 x 7 » (Binnig *et al.*, 1982).

Le SPM n'utilise pas de lentille pour produire une image agrandie. Au contraire, une sonde « locale » scanne la surface d'un spécimen et mesure une propriété physique associée à cette surface. Cette sonde est fabriquée à partir d'un matériau approprié pour mesurer la propriété particulière de la surface (Miles *et al.*, 2003). Le scanning s'effectue selon un processus simplement mécanique, mais de haute précision. Les principaux avantages du SPM résident dans le fait qu'il peut fournir des images tridimensionnelles d'une surface allant jusqu'à la résolution atomique et qu'il peut fonctionner dans différents environnements, notamment liquides, vides et gazeux. De plus, la préparation de l'échantillon prend considérablement moins de temps et elle est moins invasive que pour des microscopes conventionnels. Ces capacités sont importantes pour les systèmes d'imagerie biologique dans des environnements physiologiquement pertinents et pour l'étude de la cristallisation, de la dissolution ou de la corrosion de matériaux dans divers solvants.

Il est remarquable que, déjà vers la fin des années 1950, Feynman ait compris la nécessité de concevoir de nouveaux microscopes capables de produire des agrandissements de niveau beaucoup plus élevé. « Rendons les microscopes cent fois plus puissants, disait-il, et de nombreux problèmes biologiques deviendront plus faciles à résoudre », ajoutant en conclusion : « Je pose cette question comme un défi : n'existe-t-il pas un moyen de rendre le microscope électronique plus puissant ? » (Feynman, 1960)

Déjà en 1957, la diffraction électronique était utilisée pour sonder la surface cristalline du silicène 7-par-7, mais les résultats étaient si flous qu'ils correspondaient à plusieurs modèles d'arrangement des atomes à la surface. L'image STM a réglé presque d'elle-même ce problème, illustrant de façon spectaculaire la puissance de ce nouvel outil (Binning *et al.*, 1982). Cette image du silicène fut une révolution.

Il est intéressant de rappeler qu'au cours de ses premières années, cette nouvelle invention se heurta à une méfiance générale et même à une certaine hostilité. Étant donnée l'expérience que l'on avait auparavant des phénomènes à l'échelle atomique, en particulier du principe d'incertitude de la mécanique quantique, la possibilité de résolution à l'échelle des atomes semblait lointaine, voire impossible. À cette époque, bon nombre de personnes pensaient que ces images ne signifiaient rien du tout en dehors de la simulation informatique. Aujourd'hui, grâce à de nouveaux instruments et une recherche consistante, la bataille contre

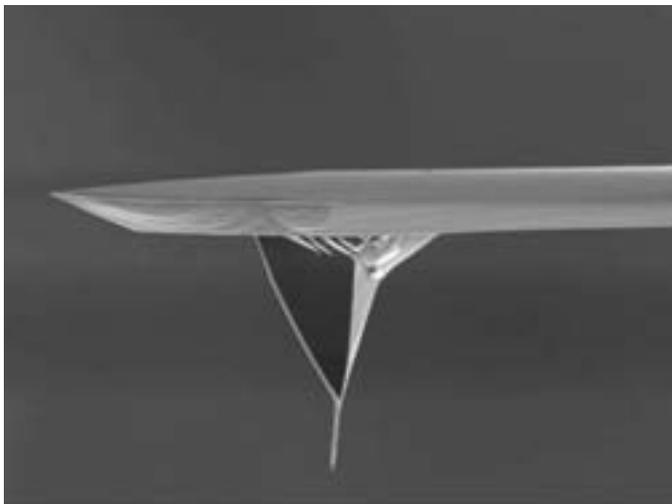
cette méfiance est gagnée. Les scientifiques doivent encore distinguer la réalité de ses reconstitutions, mais ils ne doutent plus que cela puisse être réalisé. Les interprétations donnent lieu à des discussions, mais les SPM font maintenant partie des équipements courants de différents types de laboratoires.

Les SPM peuvent identifier et localiser des propriétés telles que le magnétisme, la rugosité d'une surface et son potentiel électrique, selon le type de sonde dont ils sont équipés. Ils permettent même aux scientifiques d'atteindre le nanomonde et de le modifier, transformant ainsi la nanoscience en nanotechnologie. Les SPM peuvent entrer en contact avec la matière et même la tenir. Ils peuvent manipuler les atomes un par un.

La sélection par sonde dépend du mode opératoire et du type d'échantillon. Un nombre croissant de SPM ont été créés et commercialisés depuis les années 1990. Aujourd'hui, les chercheurs peuvent pénétrer au cœur de la matière dans le nanomonde, guidant des atomes ou des molécules individuellement et observant comment leurs environnements spécifiques les affectent. Tout cela peut s'accomplir sur différents types de matériaux, y compris du matériel biologique théoriquement non préparé. Il en résulte d'importantes améliorations de la nanomanipulation et de la nanolithographie.

Figure 1.3.

Pointe d'une sonde en nanotube de carbone d'un SPM



Source : http://www.xintek.com/products/cathodes/AFM_tip.html

Copyright © Xintek Inc

Il est intéressant de noter le retour (*feedback*) des découvertes de la nanotechnologie sur de nouvelles nanoapplications. Par exemple, les nanotubes de carbone sont maintenant utilisés pour être montés sur les sondes des SPM afin d'obtenir des pointes plus fines et donc de meilleures images (*figure 1.3*). Une plus haute résolution des images permettrait aux scientifiques d'aller plus profondément dans les matériaux et de produire ainsi de nouvelles connaissances et applications. En fait, l'on espère que les progrès de la nanotechnologie aient un effet exponentiel sur le développement de la nanotechnologie elle-même.

La technique SPM est devenue si importante pour les nanotechnologies que des réunions et des conférences lui sont exclusivement consacrées. Le troisième Symposium latino-américain sur le microscope à champ proche s'est tenu du 18 au 20 avril 2005 à Ouro Preto, au Brésil (III LASPM, 2005). Il a réuni des chercheurs venus de toute l'Amérique latine, de la Chine, de l'Europe et des États-Unis. Six exposants ont présentés des modèles de SPM destinés à différents types de matériaux et d'applications.

LE CARACTÈRE MULTIDISCIPLINAIRE DE LA NANOTECHNOLOGIE

La nanotechnologie fera-t-elle une percée technologique avec la mise en place de projets multidisciplinaires ? Cette hypothèse a donné lieu à de nombreuses discussions. Les conférences sur la nanotechnologie réunissent actuellement un public très varié, augmentant et renforçant ainsi les interactions entre différents domaines scientifiques. Partout dans le monde, de nombreux efforts tendent à créer des équipes interdisciplinaires pour étudier différents sujets comprenant notamment la biologie, la physique, la chimie, les sciences de la santé et de l'informatique. Tout chercheur ayant participé à ces équipes connaît bien les problèmes qui doivent être surmontés pour intégrer de manière fructueuse les différentes disciplines impliquées. Quoi qu'il en soit, les enjeux éthiques rendent inévitable la recherche multidisciplinaire. Ainsi, un nanotube de carbone utilisé comme enveloppe pour l'administration ciblée d'un médicament est-il dépourvu de risque toxique ou ne peut-il pas entraîner une coagulation sanguine ? Et les rejets produits au cours de la production de nanotubes de carbone ne comportent-ils pas de risques pour les êtres vivants comme par exemple l'amiante ? Des questions de ce type doivent être débattues, avant même de devenir critiques, dans

un contexte multidisciplinaire afin de réunir des informations et des points de vue provenant de différents secteurs de la société.

Cette tendance de la nanotechnologie à devenir multidisciplinaire est également due à l'usage du SPM ou microscope à champ proche. L'une des caractéristiques de cette famille de microscopes est leur utilisation pour analyser plusieurs sortes de matériaux de manière relativement facile. D'autres types de microscopes requièrent des compétences spécifiques pour la préparation des échantillons et l'analyse des images qui diffèrent, par exemple, selon qu'ils sont destinés à des chercheurs en biologie ou en science des matériaux. Dans le cas des SPM, seules les propriétés de la surface de l'échantillon sont étudiées. Très familiarisés avec ce type d'analyse, les chercheurs travaillant dans le domaine de la science des matériaux pourraient aider des chercheurs venant d'autres disciplines à se former pour utiliser ces microscopes. Cela permettrait à des équipes constituées de scientifiques appartenant à différents domaines (dont la physique, la chimie, la science et l'ingénierie des matériaux, la biologie, la pharmacie et la médecine) de commencer à travailler ensemble. Grâce à ce type d'équipe, les connaissances peuvent se diffuser plus rapidement et les problèmes environnementaux et sanitaires être identifiés plus facilement.

LES SCIENTIFIQUES ET LA NANOTECHNOLOGIE

Les scientifiques cherchent plus souvent à comprendre les phénomènes de l'univers que les implications encore invisibles d'une nouvelle découverte, ou encore les questions éthiques qu'elles recèlent. De manière générale, le besoin de réunir des données démontrant l'exactitude de leurs découvertes importe plus aux scientifiques que les applications de nouvelles connaissances. C'est pourquoi ils utilisent différentes techniques et approches. Bien que beaucoup puissent ne pas être d'accord, il n'en est pas pour autant moins évident qu'une division existe entre la recherche scientifique et l'évaluation des questions éthiques en relation avec les résultats de cette recherche. Il est clair qu'il ne serait pas raisonnable d'entreprendre une analyse éthique à n'importe quel ou à tout stade d'une recherche scientifique, mais il est également tout aussi clair qu'un équilibre entre la recherche et l'analyse éthique doit être trouvé dans l'intérêt de chacune.

Les protocoles imposés en pharmacie, médecine et sciences de la santé concernant un nouveau remède ou une nouvelle procédure se sont montrés très fiables et ne devraient pas être un obstacle pour la

recherche scientifique. Tandis que ces protocoles doivent être suivis, ils peuvent aussi être améliorés et adaptés à de nouvelles situations lorsque cela s'avère nécessaire, comme cela a été fait dans le cas des nanotechnologies. La communauté scientifique est organisée pour le faire.

Est-elle cependant prête à faire face au caractère à la fois multi- et interdisciplinaire des nanotechnologies ? En fait, les conséquences à moyen et à long terme de ces nouvelles technologies réclament une plus grande attention. Cela constitue en soi de bonnes raisons pour encourager les réunions d'experts venant des sciences exactes, des disciplines pratiques et même des sciences sociales, ainsi que des discussions entre eux. De nombreuses initiatives dans le monde entier sont déjà mises en œuvre pour développer des ressources humaines grâce à des programmes de « nanoéducation ». Ces programmes cherchent à atteindre les jeunes et à encourager le développement de perspectives, disciplines, secteurs et cultures plus souples. L'on attend de la « nanoéducation » qu'elle contribue à faire encore avancer le mouvement international qui tend de plus en plus à dispenser une formation scientifique interdisciplinaire.

Il faut également garder à l'esprit que les propriétés des nanomatériaux récemment créés ne sont pas encore bien connues. Ces propriétés peuvent s'avérer tout à fait différentes de celles des matériaux bruts, c'est-à-dire celles mesurées sur de grandes quantités de matériaux. Dans de nombreux cas, elles ne peuvent même pas être mesurées par les méthodes et les techniques conventionnelles utilisées pour étudier les matériaux bruts. Les chercheurs devront donc créer de nouvelles méthodes de mesure et de nouveaux tests pour identifier et prendre en compte les propriétés précises d'un nanomonde.

À cet égard, la métrologie constitue un champ essentiel de recherche qui doit être mieux développé. Non seulement les mesures dimensionnelles sont importantes, mais aussi celles de la dureté et de l'élasticité des matériaux qui, par exemple, peuvent déterminer une application. Le domaine de la mesure des propriétés mécaniques à la nanoéchelle a reçu une attention exceptionnelle, mais de nombreuses questions restent encore sans réponse (Oliver et Phart, 1992). La métrologie est également importante pour favoriser l'échange des connaissances scientifiques entre équipes de chercheurs et pays. Cet outil permet à chacun de parler le même langage et d'assurer que les pays moins développés puissent avoir accès aux progrès des pays développés et les assimiler. Cela présente un intérêt majeur pour empêcher que l'écart ne se creuse entre les nations et les régions.

LA NANOTECHNOLOGIE AU BRÉSIL

Les pays en développement possèdent déjà des équipes scientifiques se consacrant à la recherche en nanotechnologies. En Amérique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Chili et le Mexique ont des plans d'investissement en nanotechnologies. Trois instituts virtuels, quatre réseaux nationaux et un grand nombre de chercheurs sont impliqués dans la nanotechnologie au Brésil afin de suivre le rythme de ses progrès dans le monde et trouver des solutions à ses problèmes les plus pressants, notamment l'émergence de nouveaux virus, le paludisme, la maladie de Chaga, la dengue, le cancer, les maladies dégénératives, l'énergie et la nano-optoélectronique.

Le programme brésilien sur la nanotechnologie a prévu un budget d'environ \$E.-U. 40 millions pour 2004-2007. Il vise à développer de nouveaux produits et processus nanotechnologiques, ainsi que leurs applications industrielles. Ce montant est comparable à celui du budget de l'Inde pour les sciences et les technologies qui s'élève approximativement à \$E.-U. 20 millions. Les budgets des pays en développement sont sans aucun doute loin d'atteindre ceux de la Chine, de la Corée du Sud, des États-Unis et du Japon, nations à la pointe de ce domaine.

Le programme brésilien devrait en tirer des résultats qui donneront un élan supplémentaire à l'économie du pays, notamment dans les secteurs de l'énergie, la pétrochimie, l'industrie automobile, la technologie de l'information, la médecine, la pharmacie, la métallurgie, l'industrie minière, la protection de l'environnement et l'électro-électronique. De plus, des effets similaires sont espérés dans des domaines stratégiques tels que la sécurité nationale, personnelle, patrimoniale et alimentaire.

Les laboratoires des universités et des instituts de recherche brésiliens possèdent de bons équipements pour la production, l'analyse et la caractérisation des nanoproduits à l'échelle du laboratoire. Le nombre de publications spécialisées publiées par ces institutions est très élevé. À cela s'ajoute le fait qu'en Amérique latine, des progrès considérables ont été accomplis dans la recherche portant sur les microscopes à champ proche. Il y a dix ans, il n'y en avait que quatre au Brésil. Aujourd'hui, plus de 80 de ces instruments fonctionnent dans ce pays et cette quantité ne cesse de croître rapidement. Enfin, cet équipement est employé à des fins utiles, non seulement dans la recherche scientifique, mais encore dans des programmes visant au développement industriel et à l'innovation. Malgré cela, les résultats de la recherche traduits dans des

applications commerciales restent relativement peu nombreux. Cette situation est un sérieux problème qui devra être résolu pour que le Brésil rencontre le succès dans le monde de la nanotechnologie.

Le monde aura besoin de quelque deux millions de nanoscientifiques et ingénieurs dans les dix ou quinze prochaines années (Chang, 2006). Il est devenu aussi très important d'intégrer l'éducation continue dans la recherche et de préparer les jeunes chercheurs à travailler en collaboration avec d'autres disciplines, secteurs et cultures. Conscient de cette situation, le Brésil a créé un projet spécial concernant le développement des ressources humaines en nanotechnologie. Ce programme encourage les cours préparant à la licence et au-delà. L'on espère que le nombre de chercheurs dans de nombreux domaines de la nanotechnologie puisse au moins doubler. Ce programme a également pour objectifs d'augmenter de 200 % le nombre d'industries utilisant les produits et les processus de la nanotechnologie et de doubler le nombre de brevets déposés. Les instituts et laboratoires qui travaillent actuellement dans ce domaine recevront une aide sous la forme de nouveaux équipements et de leur entretien. Les docteurs sont encouragés à travailler à l'étranger au sein d'importantes équipes dans différents pays. De plus, des cours d'éthique et de philosophie seront dispensés dans les écoles élémentaires et secondaires.

CONCLUSION

Quatre remarques se dégagent de cette discussion :

1. La rapide évolution de la nanotechnologie dans de nombreux domaines requiert le développement d'une organisation structurée de telle sorte qu'elle puisse promouvoir une meilleure interaction entre experts venant des sciences de la nature, de l'ingénierie et de la culture.
2. L'éducation, du primaire aux études supérieures, jouera un rôle crucial dans les futurs développements des sciences et des technologies, en particulier ceux de la nanotechnologie. Sa tâche en vue de leurs progrès rapides devra consister à préparer les individus à s'impliquer dans la recherche scientifique et l'ingénierie, ainsi qu'à traiter ses développements de manière éthique. À l'avenir, un nombre de plus en plus important de chercheurs hautement qualifiés et possédant des connaissances étendues sera nécessaire.
3. La métrologie à nanoéchelle promet de fournir un moyen d'éviter la concentration des connaissances dans les pays riches. Le déve-

- loppement de nouvelles mesures techniques et l'évaluation de méthodologies standard sont nécessaires pour que la nanométrie atteigne un niveau plus élevé et deviennent plus exacte.
4. Les projets de recherche comprenant des équipes de différents pays devraient favoriser une distribution plus égale des connaissances et empêcher que n'augmente l'écart économique et social déjà existant entre les pays les plus et les moins développés.

BIBLIOGRAPHIE

- Binnig, G. ; Rohrer, H. ; Gerber, C. ; Wiebel, E. 1982. "Surface studies by scanning tunneling microscopy". In : *Physical Review Letters*, Vol. 49, 57-61.
- . 1983. "7 × 7 reconstruction on Si(111) resolved in real space". In : *Physical Review Letters*, Vol. 50, No. 2, 120-123.
- Budworth, D. W. 1996. *Overview of Activities on Nanotechnology and Related Technologies*. Seville : Institute for Prospective Technological Studies.
- Chang, R. P. H. 2006. "A call for nanoscience education". In : *Nano Today*, Vol. 1, No. 2, 6-7.
- Crichton, M. 2002. *Prey*. New York : Harper Collins. (Trad. française : *La Proie*. 2003. Paris : Robert Laffont).
- Drexler, K. E. 1986. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. New York : Anchor Books.
- http://www.e-drexler.com/d/06/00/EOC/EOC_Table_of_Contents.html (accès 16 décembre 2006)
- Esaki, L. ; Tsu, R. 1970. "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors". In : *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 14, 61-65.
- Feynman, R. P. 1960. "There's plenty of room at the bottom". In : *Engineering and Science*, Vol. 23, No. 5, 22-26, 30, 34, 36.
- <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> (accès 20 décembre 2006)
- Gonzalez, J. C. ; Rodrigues, W. N. ; Moreira, M. V. B. ; Oliveira, A. G. ; da Silva, M. I. N. ; Vilela, J. M. C. ; Andrade, M. S. ; Ugarte, D. ; Silva, P. C. 2000. "On three-dimensional self-organization and optical properties of InAs quantum-dot multilayers". In : *Applied Physics Letters*, Vol. 76, No. 23, 3400-3402.

- Wikipedia. n.d. Norio Taniguchi. http://en.wikipedia.org/wiki/Norio_Taniguchi (accès 16 décembre 2006)
- Miles, M. ; Antognozzi, M. ; Haschke, H. ; Hobbs, J. ; Humphris, A. ; McMaster, T. 2003. "Tour de force microscopy ». In : *Materials Today*, Vol. 6, No. 2, 30-37.
- Oliver, W. C. ; Pharr, G. M. 1992. "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiment". In : *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 6, 1564-1583.
- Smalley, R. E. 2001. "Of Chemistry, love and nanobots". In : *Scientific American*, Vol. 285, No. 3, 68-69.
- Taniguchi, N. 1974. "On the basic concept of nanotechnology". In : *Proceedings of the International Conference on Production Engineering*, 13-18. Tokyo : Japan Society of Precision Engineering.
- Third Latin American Symposium on Scanning Probe Microscopy (III LASPM). 2005. *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 11, Supplement S03.
- Viktor, E. 2002. *Spaceworld2000*.
<http://www.spaceworld2000.com/nanotechnology.html> <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/Artist/Viktor.html> (accès 16 décembre 2006)
- Wang, Y. K. ; Kim, M. J. ; Shan, H. W. ; Kittrell, C. ; Fan, H. ; Ericson, L. ; Hwang, W. F. ; Arepalli, S. ; Hauge, R. H. ; Smalley, R. E. 2005. "Continued growth of single-walled carbon nanotubes". In : *Nano Letters*, Vol. 5, 997-1002.

Chapitre 2

LES DERNIÈRES AVANCÉES EN NANOTECHNOLOGIE

Jixing Liu

Ce chapitre se fonde sur la définition et l'évolution de la nanotechnologie déjà mentionnées et il examine ses dernières avancées. Ce domaine en rapide expansion comprend des secteurs très étendus – depuis les branches fondamentales des sciences naturelles, telles que la chimie, la physique et la biologie, jusqu'à des applications en médecine, ingénierie et électronique. Il est nourri par des fonds substantiels venant des gouvernements et des industries du monde entier. C'est pourquoi décrire de manière précise les avancées de la nanotechnologie dépasse la tâche que peut accomplir une seule personne. Ce chapitre se restreindra donc à deux objectifs seulement : tout d'abord, donner un bref panorama de certaines réussites particulièrement importantes dans ce domaine et mettre en lumière les récents progrès publiés dans des rapports et des articles officiels, puis indiquer les grandes tendances existant dans ce domaine au moyen d'exemples plutôt que de déclarations générales et d'explications techniques. Le récent rapport sur la nanotechnologie publié par la Société royale et l'Académie royale d'ingénierie (the Royal Society et the Royal Engineering Academy) du Royaume-Uni a été très utile¹.

Si l'on écarte les progrès réalisés dans divers domaines de la nanotechnologie, les constatations suivantes semblent trouver un accord général :

1 Les chapitres 3 et 4 du rapport exhaustif des Royal Society et Royal Engineering Academy du Royaume-Uni ont été largement utilisés pour préparer ce chapitre, parfois sans référence explicite.

1. Les réussites les plus remarquables se sont produites dans la recherche sur les matériaux où les chercheurs ont non seulement accumulé des connaissances systématiques sur les propriétés spécifiques des nanomatériaux, mais encore travaillé directement sur de vrais produits réalisés à l'aide de ces matériaux.
2. Les progrès les plus étonnants à ce jour ont été réalisés dans la nanoélectronique et la technologie de l'information. Alors que de nouveaux progrès étonnants sont enregistrés dans ces domaines, personne ne sait encore quand, par exemple, seront disponibles des ordinateurs qui bénéficieront des capacités en résultant tout en étant de taille extrêmement réduite.
3. Les progrès les plus encourageants se trouvent dans le secteur médical où un nombre assez réduit de moyens efficaces pour améliorer les soins de la santé humaine ont été découverts, dont certains sont presque sur le point de pouvoir être utilisés dans les soins cliniques. Certaines inquiétudes concernant la sécurité et les effets à long terme de ces applications médicales de la nanotechnologie existent cependant.
4. Les innovations dans l'industrie fabriquant ces produits sont plutôt lentes, comparées à celles d'autres secteurs. La plupart d'entre elles en étant encore au stade de la recherche en laboratoire, il faudra un certain temps avant que des progrès significatifs ne soient réalisés dans les applications industrielles de la nanotechnologie.
5. Des techniques et des instruments de mesure plus innovants doivent être trouvés de toute urgence pour faire face aux besoins réels de l'industrie reposant sur la nanotechnologie.

Ces observations, qui donnent une idée des avancées de nanotechnologie, subiront une révision substantielle, et les nanomatériaux, les équipements et la nanométrie, la bionanotechnologie et la nanomédecine, ainsi que leurs applications industrielles, seront examinés plus en détail. L'objectif de ce chapitre étant de fournir les connaissances scientifiques générales nécessaires pour qu'une discussion éthique reposant sur de meilleures informations puisse se tenir, j'insisterai ici sur deux sujets : les nanomatériaux qui font l'objet de nombreuses inquiétudes et la nanomédecine où la discussion éthique est centrale. Après un bref exposé sur l'état actuel de ces domaines, des exemples illustreront un ou deux de leurs progrès les plus remarquables.

LES NANOMATÉRIAUX

À la suite des explications fournies dans le chapitre précédent, les nanomatériaux sont des matériaux possédant des composants fabriqués dont la dimension ne dépasse pas 100 nm. Les matériaux unidimensionnels à nanoéchelle sont de fines couches, telles que des films ou des revêtements de surface. Certaines parties des puces d'ordinateur entrent dans cette catégorie. Les matériaux bidimensionnels à nanoéchelle comprennent les nanofils et les nanotubes. Les matériaux tridimensionnels à nanoéchelle sont des particules, par exemple des précipités, des colloïdes et de minuscules particules de matériaux semi-conducteurs, ou des points quantiques. Les matériaux nanocristallins composés de grains à la taille du nanomètre appartiennent aussi à cette catégorie. Les propriétés spécifiques des nanomatériaux sont déterminées par deux facteurs principaux : leur surface relative augmentée et des effets quantiques. Ces facteurs peuvent modifier ou améliorer les propriétés des nanomatériaux, notamment leur réactivité, leur force et leurs caractéristiques électriques. Dans la catégorie des nanomatériaux de plus grande taille, il existe d'autres effets plus importants, tels que la tension de surface ou adhésivité, car ils affectent aussi des propriétés physiques et chimiques. Dans des milieux liquides ou gazeux, le mouvement brownien – mouvement de plus grosses particules ou molécules provoqué par le bombardement de plus petites molécules et atomes – est aussi important. Cet effet y rend le contrôle d'atomes ou de molécules individuels extrêmement difficile.

Les nanomatériaux unidimensionnels, tels que les films et les surfaces de revêtement, ont été inventés et utilisés depuis des décennies, notamment dans la fabrication d'instruments électroniques, la chimie et l'ingénierie. Dans l'industrie des circuits intégrés en silicone, le fonctionnement de nombreux instruments dépend de films très fins, et la manipulation de ces films, dont l'épaisseur approche des niveaux atomiques, est devenue une routine. L'utilisation des monocouches (des couches dont la profondeur a la taille d'un atome ou d'une molécule) fait également partie de la routine en chimie. La formation et les propriétés de ces couches, de la plus petite taille à la plus grande, sont bien comprises. Les progrès actuellement réalisés concernent le contrôle de la composition et de la souplesse des surfaces, ainsi que celle de la capacité d'extension des films. Les surfaces réalisées pour obtenir des propriétés spécifiques, par exemple une réactivité spécifique, sont maintenant utilisées de manière quotidienne dont nombre d'applications, y compris des cellules et des catalyseurs d'énergie.

Les blocs de construction des nanomatériaux

Les blocs de construction évolutifs des nanostructures, nanotubes, nanofils, fullerènes, points quantiques et dendrimères ont soulevé un immense intérêt dans les communautés scientifiques et technologiques au cours des dernières années. Les nouvelles propriétés électriques et mécaniques de ces matériaux ont généré une intense recherche, théorique et appliquée. Récemment, des biopolymères d'ADN et de protéine ont été fréquemment employés comme composants de nanostructures hybrides. Ces propriétés ouvrent d'importantes perspectives pour la fabrication d'équipements utilisés dans de nombreuses disciplines techniques et industrielles. De plus, les différentes nanoparticules volontairement produites pour fournir les matériaux bruts de composites jouent un rôle important dans les applications de la nanotechnologie. Les principaux résultats de la recherche sur ces blocs de construction vont maintenant être présentés.

Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (CNT) ont été étudiés dès 1991. Ce sont des tubes allongés de feuilles de graphite. Il en existe deux sortes : le nanotube monofeuillet (à une paroi) et le nanotube multifeuillet (composé de plusieurs tubes concentriques). Les deux se caractérisent par un diamètre de quelques nanomètres et une longueur allant de plusieurs micromètres à quelques centimètres. Ils sont mécaniquement très résistants (autant que le diamant), souples (autour de leur axe) et d'excellents conducteurs électriques. Dans certaines conditions, un nanotube monofeuillet peut même se révéler superconductif (Tang *et al.*, 2001), ou encore agir comme un semi-conducteur. Les propriétés optiques des CNT monofeuillets font actuellement l'objet d'une recherche intense (Bachilo *et al.*, 2002 ; Misewich *et al.*, 2003 ; Wang *et al.*, 2005 ; Chen *et al.*, 2005). Toutes ces propriétés promettent une vaste gamme d'applications potentielles, notamment dans les matériaux composites renforcés, les détecteurs, la nanoélectronique et les équipements multimédias.

Les nanotubes inorganiques

Peu après la découverte des CNT, des nanotubes inorganiques et des matériaux ressemblant aux fullerènes et basés sur des composants à feuillets, notamment le molybdenum disulfure, ont été découverts. Ils possèdent d'excellentes propriétés de lubrification, de résistance aux

chocs, de réactivité catalytique et une haute capacité de stockage de l'hydrogène et du lithium. Ces propriétés laissent toutes espérer des applications prometteuses. Les nanotubes à base d'oxyde, en particulier, sont en train d'être étudiés pour être appliqués dans les catalyseurs, les photocatalyseurs et le stockage d'énergie.

Les nanofils

Les nanofils sont des fils ultrafins ou des rangées linaires de points formés par auto-assemblage. Ils peuvent être produits à partir d'une large gamme de matériaux. Les nanofils semi-conducteurs constitués de silicium, de nitrure de gallium et de phosphure d'indium phosphide se sont révélés posséder de remarquables caractéristiques optiques, électroniques et magnétiques (par exemple, le nanofil de silice peut courber la lumière à des angles très aigus). Les nanofils ont des applications potentielles dans le stockage de données à haute densité, soit en tant que tête de lecture magnétique ou moyen de stockage modélisé, soit en tant que nano-instruments optoélectroniques pour effectuer les interconnexions métalliques d'instruments quantiques et nano-instruments. La préparation de ces nanofils repose sur des techniques sophistiquées, notamment les processus d'auto-assemblage, le dépôt de vapeurs chimiques et l'épitaxie à jet moléculaire. L'un des défis reste à trouver comment contrôler les conditions dans lesquelles produire des nanofils possédant les propriétés requises. Une très récente étude a permis de faire une importante avancée pour produire en grande quantité des nanofils en séléniure de cadmium destinés à l'optoélectronique.

Les biopolymères

La variabilité et la localisation des biopolymères, tels que les molécules d'ADN, offrent de larges possibilités pour modifier l'auto-organisation des structures des nanofils et leur donner des structures beaucoup plus complexes. Les backbones de l'ADN peuvent alors, par exemple, être revêtus de métal. Ces matériaux offrent aussi des possibilités de relier la nanotechnologie et la biotechnologie, par exemple pour produire des détecteurs biocompatibles et de minuscules et simples moteurs. L'auto-assemblage des nanostructures des backbones organiques est souvent contrôlé par de faibles interactions, telles que des liens d'hydrogène et des interactions hydrophobes de van der Waals (en général dans un milieu aqueux). Les nanostructures combinatoires consistant en polymères et composés inorganiques ouvrent de nombreuses perspectives

scientifiques et techniques et cette recherche en nanotechnologie est devenue très active.

Les fullerènes (carbone 60)

Comme cela a été mentionné, le carbone 60 (C60) est une nouvelle classe de matériau de carbone découverte au milieu des années 1980. Ce sont des molécules sphériques d'environ 1 nm de diamètre comprenant 60 atomes de carbone disposés en 20 hexagones et 12 pentagones, ayant ainsi une structure identique à celle d'un ballon de football. En 1990, une technique a été développée pour produire de grandes quantités de C60 en chauffant (à température très élevée) des tubes en graphite par résistivité dans une atmosphère d'hélium. Plusieurs applications sont prévues pour les fullerènes, notamment les utiliser comme des supports en forme de balles miniatures destinés à lubrifier des surfaces, à transporter des médicaments dans un organisme et à être utilisés dans des circuits électroniques. Une récente recherche suggère que soumettre les fullerènes à des pressions élevées permet de produire un nouveau type de matériau superrésistant, plus dur que le diamant (Dubrovinskaia *et al.*, 2005).

Les points quantiques

La théorisation des nanoparticules des semi-conducteurs (les points quantiques) a été faite dans les années 1970, avant leur création effective au début des années 1980. Lorsque l'on peut produire des particules semi-conductrices de taille suffisamment réduite, les effets quantiques interviennent de façon à limiter les énergies auxquelles les électrons et les vides (ou absence d'électron) existent dans ces particules. L'énergie étant en relation avec la longueur d'onde (ou la couleur), cela signifie que les propriétés optiques de la particule peuvent être finement produites, en fonction de sa taille. Ainsi, l'on peut produire des particules pour émettre ou absorber des longueurs d'onde précises de la lumière (couleurs) en contrôlant simplement leur taille. Récemment, l'on a trouvé des applications des points quantiques pour les composites, les cellules solaires et les marquages biologiques fluorescents (par exemple pour suivre une molécule biologique). Les progrès en chimie ont permis de préparer des points quantiques cristallins monofeuillets et monodispersés de haute qualité, d'un diamètre aussi petit que 2 nm, pouvant être traités et produits de manière adéquate en tant que réactifs chimiques.

Les dendrimères

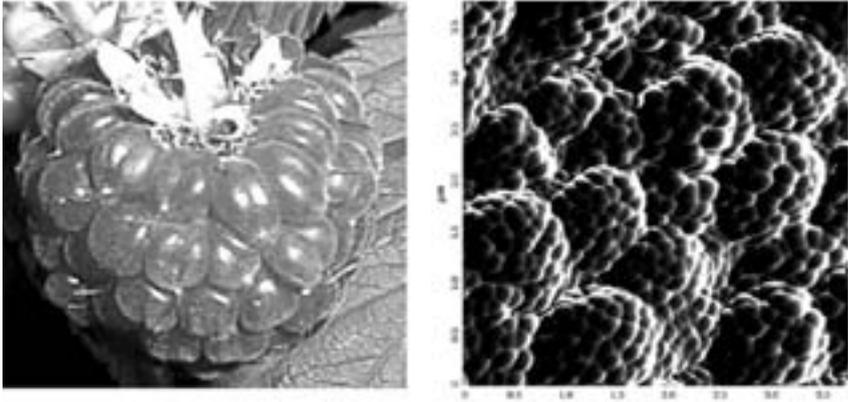
Les dendrimères sont des molécules sphériques polymériques formées au cours d'un processus hiérarchique d'auto-assemblage à nanoéchelle. Il existe de nombreux types de dendrimères, dont les plus petits ont une taille de quelques nanomètres. Les dendrimères sont utilisés dans des applications conventionnelles, dans les revêtements et les peintures, mais ils possèdent aussi une large gamme d'intéressantes propriétés qui pourraient conduire à d'autres applications utiles. Par exemple, les dendrimères agissent comme des véhicules moléculaires à nanoéchelle et pourraient ainsi être employés pour transporter des remèdes. Les dendrimères pourraient aussi servir dans la dépollution de l'environnement, car ils peuvent piéger des ions métalliques qui pourraient ensuite être récupérés par filtrage de l'eau à l'aide de techniques d'ultrafiltration.

Les nanoparticules

Les nanoparticules sont largement présentes dans la nature : elles sont produites, notamment, par l'activité photochimique et volcanique, ainsi que par les plantes et les algues. Elles ont aussi été produites pendant des milliers d'années en tant que sous-produits de la combustion et de la cuisson alimentaire, ainsi que plus récemment par les gaz d'échappement des voitures. Les nanoparticules volontairement produites, telles que les oxydes métalliques, sont de loin moins nombreuses que celles qui se créent naturellement ou proviennent des polluants. Leurs nouvelles propriétés présentent certains intérêts. Par exemple, le dioxyde de titane et l'oxyde de zinc deviennent transparents à la nanoéchelle, bien qu'ils absorbent et reflètent les rayons ultraviolets ; il est donc possible de les employer pour fabriquer des écrans solaires. Les nanoparticules sont déjà utilisées dans de nouveaux produits cosmétiques, textiles et des peintures, ainsi que dans des méthodes destinées à véhiculer des remèdes vers des cibles précises. Ces particules peuvent aussi être disposées en couches sur des surfaces, fournissant une grande superficie et donc une activité accrue applicable à une série d'applications potentielles, comme des catalyseurs. Plusieurs études récentes ont montré que la forme spécifique des agrégats de particules pourrait considérablement modifier les propriétés d'une surface – ce qui peut s'avérer utile dans de nombreux contextes. Un exemple intéressant est celui d'une surface hautement imperméable qui imite la double structure sèche de la feuille de lotus. Le revêtement consiste en un agrégat de particules sphériques

en silice ayant la forme de framboises et reliées à un film de polymère à base de résine ou *epoxy* (*figure 2.1* ; Ming *et al.*, 2005).

Figure 2.1. Topologie de la surface de films superhydrophobes (à droite) contenant des particules à base de silice qui ressemblent à une framboise (à gauche)



Source : Ming *et al.*, 2005. Copyright © Eindhoven University of Technology (Pays-Bas)

Les applications-clés des nanomatériaux

À quoi les nanomatériaux servent-ils déjà ?

Afin de régler les factures de la recherche pure et appliquée, les matériaux à nanoéchelle sont déjà présents dans un large éventail de produits. Parmi les plus connus se trouve un certain type de verre pour fenêtres qui, couvert d'une couche de particules d'oxyde de titane, réagit à la lumière solaire et se débarrasse des saletés. Lorsque l'eau tombe sur ce verre, elle se répand de manière égale sur sa surface au lieu de former des gouttelettes, puis s'écoule rapidement, entraînant les saletés avec elle. Les nanomatériaux sont utilisés par l'industrie automobile pour renforcer certaines propriétés des pare-chocs et améliorer les propriétés adhésives des peintures. D'autres utilisations des nanomatériaux dans les produits de consommation comprennent :

- Les **lunettes de soleil** utilisant des revêtements de polymères ultrafins à la fois protecteurs et antireflets. Les nanomatériaux offrent aussi des revêtements résistant aux rayures fondés sur des nanocomposites transparents et ultrafins.
- Les **textiles** possédant certaines propriétés particulières. Les propriétés protégeant du vent et de l'eau un blouson de ski, par

exemple, sont obtenues non à l'aide d'un enduit de surface, mais grâce à l'utilisation de nanofibres.

- Les **équipements sportifs**. Une cire de haute performance des skis permettant d'obtenir une surface solide et très glissante est déjà couramment utilisée. Ce revêtement ultrafin dure plus longtemps que la cire conventionnelle. Les nanotubes entrant dans la fabrication des raquettes de tennis fournissent des cordes plus résistantes. Ces raquettes sont plus solides que celles en carbone conventionnel. Le revêtement de l'intérieur des balles de tennis à l'aide d'un lacs de nanocomposites polymères a une durée de vie deux fois plus longue que celle des balles classiques.
- Les **crèmes d'écran solaire et produits cosmétiques** fabriqués à partir de nanomatériaux connaissent déjà un usage généralisé. Ce sont, par exemple, les crèmes d'écran solaire qui reflètent les rayons UV grâce au nano-dioxyde de titane, tandis que le nano-oxyde de fer est utilisé comme pigment dans certains rouges à lèvres.
- Les **outils tranchants plus solides et coupants** fabriqués à partir de matériaux nanocristallins, tels que le carbure de tungstène, le carbure de tantale et le carbure de titane, sont plus résistants à l'usage et à l'érosion et ont une durée d'emploi plus longue que leurs contreparties classiques. Ils servent à fabriquer les mèches utilisées pour perforer les tables de circuit.

Quelles futures applications peuvent avoir les nanomatériaux ?

La recherche sur les nanomatériaux suggère sérieusement que les applications pratiques suivantes seront bientôt disponibles :

- **Peintures** : des nanoparticules incorporées aux peintures amélioreront leur performance, notamment en les rendant plus légères et leur donnant différentes propriétés. Des peintures plus légères sur les avions réduiraient leur poids et donc leur consommation, ce dont l'environnement bénéficierait. Le traitement anticorrosion des surfaces offre aussi des applications intéressantes concernant les échanges calorifiques et pourrait économiser de l'énergie. Certaines peintures à nanoparticules pourraient agir comme des sources de distribution d'énergie électrique. D'autres applications des nanoparticules peuvent être employées pour des peintures changeant de couleur en fonction de la température ou du milieu

chimique, ou encore pour des peintures réduisant l'absorption des rayons infrarouges et réduire ainsi les déperditions de chaleur.

- **Dépollution** : le potentiel des nanoparticules à réagir aux polluants dans les sols et des eaux souterraines pour les transformer en composés non nocifs est actuellement à l'étude. L'une des études-pilotes de la réactivité des surfaces des nanoparticules de fer a été exploitée pour transformer des hydrocarbures chlorinés se trouvant dans des eaux souterraines en produits moins nocifs (Zhang, 2003).
- **Cellules combustibles** (*fuel cells*) : les surfaces manufacturées sont essentielles pour les cellules combustibles dont les propriétés de la surface externe et de la structure des pores affectent les performances. De l'hydrogène utilisé comme combustible directement dans les cellules appropriées peut être produit à partir des hydrocarbures produits par catalyse, habituellement dans un module réactif directement associé à la cellule combustible. L'emploi de membranes nanomanufacturées pour intensifier les processus catalytiques pourrait permettre de produire des cellules combustibles de petite échelle et plus efficaces. L'on a également découvert que l'hydrogène se condense à haute densité dans des nanotubes monofeuilletés (Dillon *et al.*, 1997 ; Heben et Dillon, 2000) qui ont stimulé un grand intérêt parmi les chercheurs travaillant sur les cellules combustibles pour trouver le moyen de stocker l'hydrogène dans des nanotubes de carbone. Une récente étude a cependant démontré que cela soulève des problèmes qui ne sont pas encore résolus (Kajiura *et al.*, 2003).
- **Écrans multimédias** : l'important marché des écrans plats haute résolution tels que ceux utilisés pour les télévisions et les ordinateurs, stimule le développement de certains nanomatériaux. Le sélénate de zinc nanocristallin, le sulfure de zinc, le sulfure de cadmium et le tellure de plomb synthétisés par les techniques sol-gel sont candidats pour la prochaine génération de phosphores émetteurs de lumière. Les nanotubes de carbone sont aussi étudiés pour fabriquer des écrans de bas voltage ; leur capacité, leur résolution, leur conductivité et leur inertie en font potentiellement des émetteurs très efficaces et d'usage à longue durée. Samsung et Motorola ont tous deux annoncé des progrès importants concernant leurs futurs écrans extra-plats (Choi *et al.*,

2003 ; Motorola Labs, 2003). La production d'écrans plats à base de nanotubes de carbone semble prochainement faisable.

- **Batteries** : la croissance d'équipements électroniques portables (téléphones mobiles, instruments de navigation, ordinateurs portables, détecteurs à distance, etc.) a entraîné une grande demande de batteries de faible poids et de densité d'énergie très élevée. Les matériaux nanocristallins synthétisés par les techniques sol-gel vont sans doute servir de séparateurs dans les batteries, car leur structure spongieuse peut contenir considérablement plus d'énergie que les batteries classiques. L'on prévoit que les batteries fabriquées à partir de métaux hybrides et de nickel nanocristallin nécessiteront d'être moins souvent rechargées et qu'elles dureront plus longtemps grâce à ces surfaces à larges grains.
- **Matériaux magnétiques** : les aimants constitués de grains nanocristallins d'yttrium-samarium-cobalt possèdent des propriétés magnétiques surprenantes provenant de leurs interfaces à grains extrêmement larges. Cela pourrait conduire à des applications destinées aux moteurs et instruments d'analyse, notamment ceux utilisés en imagerie par résonance magnétique (IRM) et des microdétecteurs. Les matériaux magnétiques fabriqués à nano-échelle ont aussi des applications dans le stockage des données. À l'avenir, les dispositifs sur les puces d'ordinateur fonctionnant maintenant en utilisant les flux d'électrons pourraient utiliser les propriétés magnétiques de ces électrons ou *spins*, ce qui présente de nombreux avantages. Les récents progrès de la recherche sur ces nouveaux matériaux magnétiques et leur nanofabrication sont ainsi très encourageants.
- **Nanoélectronique** : c'est en 1998 que Dekker et son équipe ont annoncé leur invention du premier transistor fabriqué à partir d'un seul nanotube de carbone dans la revue *Nature* (Tans *et al.*, 1998). Ils ont démontré qu'un nanotube monofeuillet déployé sur deux électrodes prédisposées, comme une sorte de portail, ne nécessite qu'un seul électron pour alterner « marche » et « arrêt ». Ces expérimentations ont suggéré que les nanotubes pourraient un jour être utilisés comme matériaux de construction et interconnexions dans les applications nanoélectroniques. Les instruments électroniques à base de nanotubes semblent cependant présenter encore de véritables défis. L'électronique des nanotubes de carbone rencontre encore nombre de sérieux problèmes,

notamment la fabrication à large échelle d'instruments divers et le contrôle de la croissance des nanotubes de carbone métallique et semi-conducteur, problèmes qui doivent être résolus avant qu'ils puissent devenir une alternative technologique intéressante des puces de silicium. Néanmoins, si l'on considère la rapidité avec laquelle les transistors à nanotubes de carbone ont été étudiés, les résultats sont déjà impressionnants et ils laissent espérer la production d'une nanoélectronique puissante, fondée sur le nanotube de carbone.

- **Implants médicaux** : les implants médicaux actuels, orthopédiques ou cardiaques, sont en alliage de titane et d'acier inoxydable parce que tous deux sont biocompatibles. Toutefois, dans certains cas, ces alliages métalliques se détériorent plus vite que la durée de vie du patient. L'oxyde de zircon nanocristallin (zirconia) est dur, durable, résistant à la corrosion et biocompatible. Ce matériau se présente donc comme une alternative intéressante pour les implants.
- **Purification de l'eau** : les membranes de nanofabrication vont rendre les processus de filtration de l'eau plus efficaces et réclamer potentiellement moins d'énergie. Ces applications devraient améliorer les coûts des technologies déjà disponibles.

Les nanoparticules sont-elles toxiques ?

Au fur et à mesure que les nanoparticules trouvent des applications plus nombreuses, en particulier celles entrant dans divers produits d'usage quotidien, la probabilité d'être en contact avec elles augmente pour un nombre croissant de personnes. Sont-elles toujours bénéfiques pour les humains ? Deux études expérimentales très récentes ont répondu négativement. Le premier groupe de chercheurs a conclu de son expérimentation que les nanotubes monofeuillets et les nanotubes multifeuillets ont activé des plaquettes humaines et stimulé leur agrégation, et ces matériaux ont aussi stimulé le blocage de la carotide chez le rat (Radomski *et al.*, 2005). La seconde expérimentation a montré qu'exposer des cellules de peau humaine à des nanotubes multifeuillets de carbone et à des nano-oignons multifeuillets de carbone (des grappes d'atomes de carbone ayant la forme de fullerènes multicoques ressemblant à un oignon commun) bloquent les cycles cellulaires et accélèrent la mort cellulaire. Ces chercheurs ont observé les profils de l'expression des gènes et découvert que les exposer à des nanomatériaux perturbe

de nombreux sentiers cellulaires (Ding *et al.*, 2005). Ces deux études ajoutées à un rapport antérieur, intitulé *Buckyballs cause brain damage in fish* ou « Les buckyballs (fullerènes) endommagent le cerveau des poissons », ont lancé au moins trois cris d'alarme concernant la toxicité des nanoparticules. Toutes ces découvertes indiquent que des directives sont nécessaires pour gérer sans danger les nanoparticules.

INSTRUMENTATION ET NANOMÉTROLOGIE

La capacité de mesurer et caractériser les matériaux (déterminer leur taille, forme et propriétés physiques) à nanoéchelle est cruciale pour la nanotechnologie. Elle est en relation directe avec la possibilité ou non de produire des nanomatériaux et des instruments possédant un degré élevé de précision et de sécurité, et de réaliser des applications. En leur état actuel, les progrès dans ce domaine peuvent être résumés ainsi : grâce à l'invention de nombreux et puissants instruments, il est devenu possible d'imager et de manipuler des atomes pour construire des modèles à nanoéchelle. Les mesures et la caractérisation des nanostructures dans les surfaces progressent à bon rythme dans les laboratoires. De sérieux problèmes concernant l'instrumentation et la métrologie à nanoéchelle doivent néanmoins être résolus pour répondre aux besoins de l'industrie basée sur la nanotechnologie.

Principaux instruments utilisés en nanotechnologie

Trois catégories d'instruments variés sont utilisées en nanotechnologie : les microscopes électroniques à transmission, les microscopes à balayage de sonde et les pinces optiques.

Les techniques de microscopie à transmission électronique

Le microscope à transmission électronique (TEM) est utilisé pour explorer les structures internes des micro- et nanostructures. Le TEM peut révéler les moindres détails d'une structure interne et, dans certains cas, des atomes individuels. Le TEM et le microscope à transmission électronique de haute résolution (HRTEM) font partie des instruments les plus importants pour rendre l'image de la structure interne d'un échantillon. De plus, le HRTEM adéquatement équipé permet l'analyse chimique. Le microscope à balayage de sonde (SEM) utilise de nombreuses technologies de base, tout d'abord inventées pour les TEM, afin de produire des images des traits caractérisant la surface

d'un échantillon. La meilleure résolution spatiale existant actuellement est de l'ordre de 1 nm.

Les techniques à balayage de sonde

Les microscopes à balayage de son (SPM) utilisent l'interaction entre une pointe très fine et une surface pour obtenir une image. L'embout est maintenu près de la surface à examiner et il est balayé d'avant en arrière. Le microscope à effet tunnel (STM) utilise une pointe conductrice très fine, maintenue suffisamment près d'une surface (en général à environ 0,5 nm) pour que les électrons franchissent cet espace. Cette méthode fournit des données structurales et électroniques de la surface avec une résolution atomique. L'invention du STM a directement conduit à la création d'autres microscopes « à balayage de sonde », notamment le microscope à force atomique (AFM). Ce dernier utilise une pointe très fine à l'extrémité d'un levier très flexible ou *cantilever*. À la différence du STM où l'image doit être conductive, un AFM peut fournir l'image de matériaux isolants simplement parce que le signal correspond à la force entre la pointe et l'échantillon. Une véritable résolution à niveau atomique peut ainsi être réalisée. Enfin, comme cela a été précédemment mentionné, le SPM a la capacité de manipuler séparément les atomes.

Les pinces optiques (piégeage optique ou laser)

Les pinces optiques utilisent un seul rayon laser (concentré par un objectif de microscope de haute qualité) sur un point d'un spécimen. La radiation de la pression et les énergies irradiées par ce point créent un « piège optique » qui permet de maintenir une particule au centre. De faibles énergies interatomiques et leurs déplacements peuvent être alors mesurés. Les échantillons qui peuvent être ainsi analysés vont d'atomes isolés et de sphères de la taille de microns aux brins d'ADN et aux cellules vivantes. Les pièges optiques sont maintenant utilisés comme une méthode standard de manipulation et de mesure. De nombreux pièges peuvent être utilisés simultanément avec d'autres techniques optiques telles que les scalpels au laser qui peuvent découper la particule en train d'être étudiée.

Ces instruments de mesure utilisés avec d'autres techniques analytiques et des outils de la nanoproducture (notamment des machines à bombardement ionique ou FIB) permettent d'obtenir de l'information sur la topologie et la structure défectueuse d'une surface ou d'une interface à une distance proche de l'échelle atomique – par exemple, les

mesures de molécules et de structures biologiques prises séparément, notamment celles de nanotubes monofeuillets, ont déjà été réalisées. Cela permet de mieux comprendre la relation entre la forme et les propriétés des matériaux et, en contrôlant les processus à nanoéchelle, de concevoir des matériaux possédant des propriétés spécifiques.

Les défis de la nanométrie

Les mesures à nanoéchelle ont peu de sous-effets métrologiques et les standards sont insuffisants pour assurer leur fiabilité et répétabilité. Par exemple, l'énergie applicable ou l'instrumentation de la masse avec une sensibilité adéquate pour travailler à nanoéchelle n'existent pas encore. Cela constitue l'un des facteurs majeurs freinant la fabrication industrielle à nanoéchelle. C'est l'un des plus importants problèmes que la nanométrie doit résoudre pour produire des instruments fiables et à faible coût, ainsi que pour mettre au point des standards internationaux pour mesurer les phénomènes à nanoéchelle et pour caractériser et manipuler les nanostructures.

LA BIONANOTECHNOLOGIE ET LA NANOMÉDECINE

Les instruments à nanoéchelle les plus complexes et les plus fonctionnels sont les assemblages moléculaires se produisant naturellement ; ce sont ceux qui régulent et contrôlent les systèmes biologiques. Les protéines, par exemple, sont des structures moléculaires possédant des fonctions hautement spécifiques qui participent à presque tous les processus sensoriels, métaboliques, ainsi qu'à ceux assurant la transmission d'information et le transport moléculaire. Le volume d'une seule molécule ou « nano-instrument biologique », tel qu'une protéine, se situe entre un millionième et un milliardième de celui d'une cellule individuelle. Ainsi, le monde biologique contient de nombreux « instruments » et « machines » à nanoéchelle.

La bionanotechnologie s'occupe des propriétés et applications à l'échelle moléculaire des nanostructures biologiques. En utilisant des techniques de nanofabrication et des processus d'auto-assemblage moléculaire, la bionanotechnologie permet la production de matériaux et d'instruments tels que des montages tissulaires et cellulaires, des moteurs moléculaires et des biomolécules destinés à des détecteurs, au transport interne de remèdes et à des applications mécaniques. La bionanotechnologie est utilisée en médecine pour une approche aussi bien qu'une sélection systématique permettant de découvrir des

remèdes, de faciliter des diagnostics et des thérapies et d'obtenir des images à niveaux cellulaire et sub-cellulaire avec une résolution plus élevée que celle de l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

La nanoscience dans ce domaine

Le but essentiel d'une majeure partie de la recherche actuelle est d'obtenir une compréhension précise des mécanismes biochimiques et biophysiques fondamentaux au niveau des molécules individuelles. Ces connaissances permettront de déterminer les lois naturelles régissant les machines moléculaires, ce qui peut conduire à de nouvelles applications technologiques. Les outils développés au cours des dernières années (par exemple les SPM) permettent l'observation directe du comportement de molécules individuelles à l'intérieur de systèmes biologiques. Ce sont, par exemple, des moteurs rotatifs moléculaires qui animent des flagelles bactériennes, « propulseurs » relativement grands (45 nm), vers de minuscules enzymes (9 nm) qui catalysent la conversion de l'énergie en processus biologiques. La séquence complexe des changements dans la structure moléculaire constituant la base de ces engins biomoléculaires peut maintenant être directement mesurée en utilisant des microscopes à force atomique (AFM) et des pinces optiques. Les récents développements des AFM à vitesse élevée ont permis d'observer directement et en temps réel le mouvement moléculaire à l'intérieur d'un moteur moléculaire. Les futurs instruments de la bionanotechnologie et de la nanomédecine peuvent exploiter de nombreuses catégories de matériaux biologiques fonctionnels.

Un groupe de protéines attire actuellement l'attention des chercheurs sur les protéines des membranes. Elles constituent aussi une catégorie d'engins à base de protéines qui régulent de nombreux processus physiologiques. Elles comprennent des chemins ioniques qui permettent le flux rapide, tout en étant sélectif, à travers les membranes des cellules, des récepteurs hormonaux qui se comportent comme des gâchettes, des déclencheurs moléculaires, et des photorécepteurs répondant de manière différente selon les états des molécules par l'absorption d'un seul photon, ce processus étant celui de la vision et de la photosynthèse. Le fait qu'environ un quart de tous les gènes code les protéines des membranes est la preuve de leur immense importance biologique. L'on pense qu'elles deviendront les cibles de 80 % des nouveaux remèdes. Les techniques concernant l'observation et la manipulation des molécules individuelles sont maintenant généralisées pour étudier la sélectivité

et les mécanismes de contrôle des chemins ioniques, ainsi que leurs réactions aux remèdes.

Applications actuelles et futures

Des structures biomimétiques basées sur les moteurs naturels peuvent être réalisées, notamment des caténanes et des rotaxanes, des composés se comportant comme des moteurs moléculaires rotatifs, ou bien linéaires. Leurs applications médicales sont particulièrement prometteuses. Une recherche intensive porte actuellement sur le diagnostic des maladies, le transport interne des remèdes et l'imagerie moléculaire. Aux États-Unis, des produits paramédicaux contenant des nanoparticules sont maintenant sur le marché. Ce sont, par exemple, des pansements qui, exploitant les propriétés antimicrobiennes bien connues de l'argent, contiennent de l'argent sous sa forme nanocristalline qui libère des ions pendant une certaine période afin de produire un large spectre antimicrobien concernant 150 agents pathogènes différents (Sample, 2001).

Les technologies à puce

Les technologies à spectre, extraordinairement puissantes, utilisent des échantillons biologiques relativement importants à l'échelle du micromètre. Leur exactitude, leur taille et leur capacité d'analyser les données sont continuellement améliorées. L'approche puce à ADN, comprenant un microréseau de molécules d'ADN sur un porteur inerte, est actuellement quotidiennement utilisée dans l'analyse des gènes et des protéines. La nanotechnologie tend désormais vers la recherche de résolutions plus élevées et de volumes plus réduits des échantillons. Les technologies de *lab-on-a-chip* (systèmes intégrant de multiples fonctions de laboratoire sur une seule puce), utilisées pour établir et vérifier des diagnostics, atteignent aujourd'hui la taille du micromètre, mais les progrès faits dans la connaissance des systèmes nanofluides peuvent conduire à la production de systèmes à nanoéchelle. Leurs applications pourraient comprendre l'amélioration d'instruments de détection d'agents biologiques et chimiques sur le terrain (Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004).

L'électronique et les technologies de l'information et de la communication (TIC)

L'un des objectifs de la recherche bionanotechnologique est d'utiliser la fonctionnalité hautement spécialisée des protéines dans des équipe-

ments tels que les détecteurs moléculaires. L'un des défis les plus importants consiste à comprendre les propriétés électroniques fondamentales des molécules et des mécanismes par lesquels une charge électronique est transférée entre les molécules et les métaux, les semi-conducteurs et les nouveaux composants nanoélectroniques tels que les nanotubes de carbone (CNT). Les progrès dans ce domaine pourraient permettre d'intégrer ces molécules « intelligentes » (*smart*) dans des instruments et des circuits permettant des applications spécifiques des CNT. Réaliser un transistor à base de protéines est un immense défi scientifique. L'ADN lui-même peut s'avérer un matériau électronique utile bien que le poids de la preuve expérimentale indique que ce n'est pas un bon conducteur électrique. Néanmoins, en l'utilisant comme modèle, des nanofils d'ADN « revêtus » d'or ou d'argent peuvent être produits et des circuits intégrés utilisant les interconnexions de l'ADN et son information codée ont été déjà réalisés. Plus récemment, une méthode simple pour créer de solides « pyramides » d'ADN s'auto-assemblant en quelques secondes a été inventée. Chaque côté de ces pyramides tétraèdres est constitué d'une double hélice d'ADN. Ces pyramides peuvent être ensuite reliées en nanostructures tridimensionnelles plus grandes sur lesquelles construire des circuits électroniques moléculaires (Goodman *et al.*, 2005).

L'on a maintenant découvert que les films très fins et les cristaux de la membrane de la protéine bactériorhodopsine ont des applications photoniques potentielles pour fabriquer des modulateurs de lumière dans l'espace, des mémoires et des détecteurs holographiques optiquement utiles. Dans cette protéine, le centre de réaction photosynthétique, d'une taille de 5 nm seulement, se comporte comme une diode de nanomètre et peut donc être employée pour faire d'une seule molécule un instrument optoélectronique. Par exemple, son intégration à des CNT électriquement conducteurs et aux électrodes d'un nanomètre pourrait permettre de produire des logiciels, des transducteurs, des cellules photovoltaïques, des mémoires et des détecteurs.

Les techniques d'auto-assemblage

L'approche descendante (*top-down*) de la nanofabrication présente l'avantage de permettre la production de structures prédéterminées, ce qui ne s'avère pas facile, comme nous allons le voir. Une grande attention se concentre à présent sur les processus impliquant l'auto-assemblage moléculaire à un certain niveau, sur les matériaux biologiques

possédant des avantages intéressants et sur des matériaux inorganiques à cause de la diversité des structures auto-assemblées qu'ils peuvent produire. Dans le monde naturel, l'évolution a produit une étonnante diversité d'instruments biomoléculaires et, comparés aux technologies conventionnelles, bon nombre d'instruments moléculaires naturels font preuve d'une immense fonctionnalité. Les structures géométriques et les nanomachines basées sur l'ADN (y compris les cristaux artificiels) font partie des exemples les plus extraordinaires des structures synthétiques maintenant fabriquées.

Le transport interne de remèdes

La nanotechnologie possède un énorme potentiel pour être appliquée au transport interne des gènes et des remèdes. Elle peut utiliser comme véhicule une nanoparticule fonctionnalisée capable de cibler des cellules malades spécifiques, véhicule contenant à la fois des agents thérapeutiques relâchés dans la cellule et un détecteur les régulant. Différentes avancées de cette approche sont déjà validées, mais le ciblage et le contrôle de ces lâchers ne sont pas encore au point. La voie est néanmoins ouverte pour de premiers essais et ces techniques seront soumises aux mêmes directives que tous les nouveaux produits pharmaceutiques.

Une approche analogue est déjà utilisée pour les remèdes à base de polymères, les conjugaisons de protéines et polymères, les micelles polymériques avec lesquelles les remèdes sont covalents et les complexes à multicomposants en train d'être développés en tant que vecteurs non viraux dans la thérapie génique.

Nombre de ces matériaux sont maintenant soumis à des tests cliniques concernant diverses maladies. La thérapie génique où de l'ADN est inséré dans une particule à nanoéchelle est très prometteuse pour les traitements de maladies causées par des anomalies génétiques, notamment les fibroses kystiques et les systèmes immunitaires déficients. Les approches alternatives non virales de la bionanotechnologie sont étudiées de manière très active bien que l'on n'en soit pas encore aux essais cliniques. Les avantages de ces approches comprennent la souplesse de la chimie synthétique (qui permet de mettre à dimension voulue le poids moléculaire), l'addition de propriétés biomimétiques à celles produites par l'homme et même la possibilité d'y inclure des éléments biorépondants.

La découverte de remèdes

Les techniques de la nanotechnologie offrent la possibilité d'étudier les interactions des récepteurs de remède au niveau d'une seule molécule, par exemple en utilisant des pinces optiques et des AFM permettant des observations plus directes. Cette approche pourrait aussi permettre, par exemple, de découvrir une maladie au niveau d'une cellule isolée longtemps avant que ses symptômes physiques ne se manifestent. Cela a déjà été fait en pilotant des modifications dans les énergies des atomes et en modifiant la conductivité ionique d'un seul récepteur ou d'un chemin ionique au moment où s'attache la molécule servant de remède. Ce procédé industriel demandera cependant le développement d'une large gamme d'instruments fonctionnant en parallèle pour créer une capacité très élevée de surveillance du processus.

L'imagerie médicale

Les techniques d'imagerie non invasives ont eu un impact majeur sur la médecine au cours des 25 dernières années. Le courant actuel dans le développement de techniques telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) consiste à améliorer la résolution spatiale et les agents de contraste. La nanotechnologie rend déjà possible l'imagerie intracellulaire en attachant des points quantiques ou des chromophores synthétiques à des molécules sélectionnées, par exemple des protéines, ce qui permet l'investigation directe des processus biochimiques intracellulaires.

Les implants et la prothétique

Nous avons vu que divers matériaux, par exemple les céramiques nanocristallines, possèdent certaines propriétés (dureté, longue durée de vie, biocompatibilité, etc.) permettant de les utiliser comme implants à long terme. Le développement de systèmes nanoélectroniques possédant des densités élevées de détection et la capacité de traiter les données peut permettre la production de rétines et de cochlées artificielles. D'importants progrès sont actuellement réalisés dans ce domaine, mais de nombreux problèmes doivent encore être résolus avant que ces systèmes ne deviennent des traitements viables. De même, l'introduction de la nanoélectronique permettra d'explorer les processus neuronaux biologiques grâce à l'amélioration de la résolution spatiale. Des cultures de neurones de rongeurs ont été réalisées sur des surfaces nanofabriquées pour former des circuits de neurones élémentaires dans lesquels des

signaux électriques peuvent être mesurés. Les impulsions électriques envoyées à ces circuits ou émises par eux permettent de comprendre comment les neurones créent de la mémoire à partir de leurs réponses à différentes sortes de stimuli.

Cette recherche laisse espérer de pouvoir aider des personnes à recouvrer la vue ou de restaurer les fonctions musculaires de patients souffrant de la maladie de Parkinson. Ces progrès soulèvent toutefois des questions éthiques sur l'amélioration de la condition humaine et la convergence des technologies, en particulier celles de savoir si disposer de moyens de modifier le corps humain en améliorant les capacités pourrait réduire le rôle des handicapés dans la société, et si les progrès des technologies de traitement de l'information et de stockage des données combinés à ceux de la physiologie pourraient conduire à la possibilité d'une amélioration non thérapeutique de ces performances.

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les applications actuelles de la nanotechnologie concernent surtout la caractérisation des matériaux, la production de produits chimiques et de matériaux, ainsi que l'industrie de précision. De manière générale, ces applications se présentent plutôt comme des avancées que des bouleversements.

La caractérisation

La caractérisation des matériaux – déterminer leurs forme, taille, distribution, propriétés mécaniques et chimiques – constitue une part importante de leur industrialisation. Elle sert essentiellement autant au contrôle de la qualité qu'elle fait partie de la recherche et du développement de nouveaux procédés, matériaux et produits. Comme nous l'avons déjà vu, les grandes percées de la nanotechnologie se sont produites dans le domaine des instruments employés pour observer et mesurer des propriétés et des processus à nanoéchelle. Des instruments sophistiqués (STM, AFM et TEM) rendent possible la caractérisation des surfaces et des interfaces de matériaux à nanoéchelle, permettant ainsi d'observer et d'analyser des atomes individuels. Cela a entraîné une meilleure compréhension de la relation entre la forme et les propriétés matérielles et permis le contrôle de processus à nanoéchelle, ainsi que la conception de matériaux possédant des propriétés spécifiques. Toutefois, la commercialisation

de ces matériaux avancés demande qu'ils puissent être produits de manière fiable, prévisible et en quantités suffisantes. Tant que cela ne sera pas possible, leur production restera limitée aux universités, centres de recherche et départements de recherche et développement (R&D) des industries.

Les techniques de fabrication

De nombreuses techniques permettent de créer des nanostructures, mais leur production se divise en deux grandes catégories : l'une ascendante (*bottom-up*) et l'autre descendante (*top-down*).

Les techniques de production ascendantes

Les techniques de production ascendantes impliquent la construction de structures atome par atome, ou molécule par molécule. Pour y parvenir, l'une des trois méthodes suivantes est utilisée : la synthèse chimique, l'auto-assemblage et l'assemblage positionnel. L'assemblage positionnel est la seule technique permettant de placer délibérément un à un des atomes, ou des molécules individuelles.

1. La synthèse chimique

La synthèse chimique est une méthode destinée à produire des matériaux bruts, tels que des molécules ou des particules, qui peuvent ensuite être utilisés soit directement dans des produits sous leur forme non ordonnée, soit en tant que blocs de construction de matériaux plus avancés et ordonnés. Les oxydes métalliques (dioxyde de titane, oxyde de zinc, dioxyde de silice, oxyde d'aluminium, oxyde de zircon et de fer) sont actuellement les nanoparticules les plus importantes commercialement. Elles sont disponibles sous la forme de poudres et de suspensions liquides. Toutefois, les matériaux réellement à nanoéchelle et nanostructurés sont encore au stade de la synthèse de laboratoire (quelques kilos par jour, voire moins). Même ainsi, la forme et la taille des nanoparticules produites sont très diverses.

2. Le rôle de l'auto-assemblage

L'auto-assemblage est une technique ascendante de production dans laquelle les atomes ou les molécules s'organisent eux-mêmes en structures ordonnées à nanoéchelle par des interactions physiques ou chimiques entre leurs unités. Bien que l'auto-assemblage

existe dans la nature depuis des temps immémoriaux, son apparition dans l'industrie est relativement nouvelle. Les processus suivant lesquels des matériaux ou des composants fabriqués se forment eux-mêmes pour l'essentiel présentent un intérêt économique et environnemental certain, car ils créent moins de déchets et utilisent moins d'énergie. La compréhension que l'on en a actuellement ne va néanmoins pas au-delà de la création de systèmes assez rudimentaires. Une technique potentielle de traitement, connue sous le nom d'auto-assemblage dirigé, implique l'utilisation d'une énergie ou d'un champ électrique ou magnétique externe pour accélérer le processus d'auto-assemblage, car celui-ci est souvent assez lent. Cette technique est intéressante dans un contexte industriel. Les blocs de construction les plus utiles, les CNT, peuvent être produits de plusieurs façons. Toutefois, en l'absence d'une meilleure compréhension de leur mécanisme de croissance, la production sélective et uniforme de CNT possédant des dimensions et des propriétés physiques spécifiques n'a pas encore abouti. Et la capacité de production reste très basse. L'on estime que la capacité actuelle de production de CNT s'élève à environ 100 tonnes par an (Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004). Comparée à la capacité de production des tubes monofeuillets, s'élevant à environ 9 tonnes par an, il semble que celle des tubes multifeuillets soit la meilleure.

3. L'assemblage positionnel

La dernière technique ascendante de production est l'assemblage positionnel où les atomes, les molécules ou les agrégats sont manipulés et positionnés un par un à l'aide des SPM ou des pinces optiques. Cette technique est extrêmement laborieuse. Cela montre qu'actuellement cette méthode n'est pas adaptée pour une production industrielle.

Les techniques de production descendantes

Les techniques de production descendantes impliquent de travailler d'abord sur une partie importante du matériau et d'en retirer le nécessaire pour produire une nanostructure. L'ingénierie de précision et la lithographie sont deux techniques-clés pour la production de type descendant qui a été développée par et affinée pour l'industrie des semi-conducteurs au cours des 30 dernières années. Les méthodes

descendantes offrent une fiabilité et permettent une certaine complexité, bien qu'en général elles consomment plus d'énergie et produisent plus de déchets que les techniques ascendantes. Les méthodes ascendantes ne permettent pas encore, par exemple, la production de puces pour ordinateurs.

1. L'ingénierie de précision

De manière générale, une grande partie de l'industrie électronique se fonde sur l'ingénierie et la production de précision – qu'il s'agisse de la production de lamelles de silicone utilisés comme substrats pour les puces des ordinateurs, d'agencements mécaniques pour positionner ces lamelles, ou encore de l'optique de précision utilisée pour y imprimer des circuits. Grâce à la combinaison de nombreux progrès (l'utilisation de matériaux avancés pour des outils tranchants ; des superstructures de machines très résistantes et solides ; de nouveaux moteurs linéaires ou rotatifs et des détecteurs combinant le contrôle de la taille et le contrôle numérique, ainsi que les technologies avancées de servo-drive), des outils-machines ultraprécis possèdent maintenant des performances très élevées pour produire des instruments à nano-échelle possédant une surface de forme simple, consommant peu d'énergie et produisant peu de déchets. Le contrôle très précis des processus et de la température est nécessaire pour atteindre ce niveau de performance (ici, de l'ordre d'environ 0,01 °C).

2. La lithographie

La lithographie implique de modeler une surface en l'exposant à la lumière, c'est-à-dire des ions ou des électrons, puis de graver et/ou déposer du matériau sur cette surface afin d'obtenir le produit désiré. La capacité de modéliser des caractéristiques à l'échelle du nanomètre est fondamentale pour que l'industrie TIC progresse. Les méthodes utilisant soit les électrons, soit les ions sont toutes deux capables de produire des structures inférieures à 10 nm, mais elles sont trop lentes pour être utilisées directement à des fins de grande production. La lithographie optique est employée pour produire des semi-conducteurs. Bien qu'elle ne bénéficie pas de la résolution des techniques laser, elle permet une production à débit rapide et économique. Les besoins en structures de ce type lui ont attiré d'importantes demandes techniques.

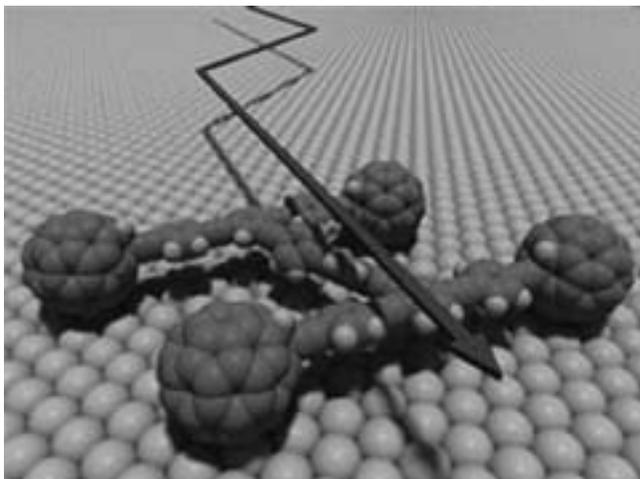
Évaluation d'ensemble de la production de nanostructures

L'on peut déduire du panorama que nous venons de dresser qu'étant donné leurs avantages, nombreux et évidents, sur les méthodes de production de type descendant, notamment l'économie de matériaux et d'énergie, les méthodes de type ascendant de production de nanostructures devraient être les plus recherchées pour développer les applications de la nanotechnologie dans l'industrie. Les performances actuelles de cette approche montrent cependant qu'elle n'est pas encore parvenue au stade de production à grande échelle. Comme nous l'avons souligné, les produits fabriqués par les méthodes de type ascendant ne dépassent pas encore l'échelle des laboratoires de recherche en raison de leur capacité de production bien en dessous de ce qui est nécessaire pour des applications industrielles. Le fait qu'un gramme de nanotube monofeuillet de carbone coûte beaucoup plus cher qu'un gramme d'or rend cette situation évidente. De même, bien que nombre de délicates nanostructures – notamment les minuscules machines biomimétiques et les récents nanovéhicules récemment inventés (Shirai *et al.*, 2005) (*figure 2.2*), assemblés dans les laboratoires utilisant la méthode ascendante – promettent d'intéressantes applications, un long chemin reste encore à parcourir avant que la fabrication de ces structures soit possible à grande échelle.

À la différence de la méthode ascendante, la méthode descendante est une technique bien plus mûre pour la production industrielle de nanostructures ; elle permet la fabrication à grande échelle de puces d'ordinateurs qui sont déjà à nanoéchelle. Néanmoins, cette technique reste pour l'essentiel une extension de la microtechnologie développée par l'industrie des semi-conducteurs. L'appliquer à la nanoéchelle est encore bien plus difficile. L'on pense que, lorsque les puces en silicone seront réduites à la taille de 45 nm, ou même moins, ces puces auront atteint leurs limites de tolérance physique et la méthode descendante dans ce secteur cédera le pas à la méthode ascendante. C'est pourquoi la nouvelle version du *roadmap* (« plan stratégique » ou « feuille de route ») semi-conducteur a commencé en 2006 pour inclure des commutateurs fabriqués suivant la technique de type ascendante comme étant le choix de l'ère post-silicone.

La convergence des deux méthodes, ascendante et descendante, de fabrication de nanostructures est une tendance actuelle notable qui est apparue à l'aube du XXI^e siècle. Cette convergence semble conduire à de nouvelles méthodes de production très intéressantes et à la fabrication plus efficace de nanostructures et de nano-outils.

Figure 2.2. Nanovéhicule produit en laboratoire²



Source : Shirai et al., 2005. Copyright © Rice University

En bref, les applications industrielles de la méthode ascendante sont encore balbutiantes, alors que la méthode descendante de production a déjà trouvé sa place dans la fabrication des puces pour ordinateurs. À long terme, cependant, la méthode descendante sera remplacée par l'ascendante ou par des méthodes hybrides. L'industrie de production basée sur la nanotechnologie, au sens strict, n'existe pas encore.

DERNIÈRES REMARQUES POUR CONCLURE

En guise de conclusion, voici quelques observations :

1. La nanotechnologie est un domaine des sciences et des technologies de nature intrinsèquement interdisciplinaire : son développement continu élargira prodigieusement la compréhension que les humains ont de la nature et permettra le progrès social de l'humanité.

Le développement de la nanotechnologie a déjà effacé de manière significative les frontières séparant différentes disciplines scien-

2 Le *nanocar* ou nanovéhicule consiste en un châssis et des axes constitués de groupes organiques bien définis avec un système de suspension et des axes pivotant librement. Les roues sont des *buckyballs*, sphères de carbone pur contenant 60 atomes. Le véhicule entier mesure à peine 3-4 nm de largeur, c'est-à-dire qu'il est à peine plus grand qu'un brin d'ADN. Ses roues sphériques à base de fullerène C60 et ses axes pivotant librement à base d'alkynes permettent de diriger le roulement à nanoéchelle d'une structure moléculaire. Adapté de http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=12107.

tifiques et il a réuni dans un domaine commun des scientifiques et des ingénieurs venus de spécialités diverses. Dans ce domaine véritablement interdisciplinaire qui rassemble la physique, la chimie, la biologie, l'ingénierie et d'autres disciplines, un grand nombre de résultats innovants ont été obtenus au cours de la dernière décennie et d'autres encore plus enthousiasmants sont attendus prochainement. Tous ces résultats ouvrent la voie à une nouvelle révolution. Néanmoins, les progrès accomplis se limitent encore, pour l'essentiel, à la recherche en laboratoire et au stade expérimental. La nanotechnologie en est encore à un stade primitif de développement ; une industrie de production véritablement opérationnelle n'est pas encore devenue une réalité.

2. Les pays en développement jouent maintenant un rôle plus important dans le développement de la nanotechnologie. C'est une tendance significative qui devrait apporter des avantages à la majorité des populations de la Terre et permettre de supprimer l'écart économique entre pays développés et pays en développement.

Jusqu'à la fin du xx^e siècle, les technologies les plus avancées étaient développées et dominées par les pays développés, ce qui creusait les écarts existant entre les connaissances, la technologie et l'économie des pays développés, riches, et celles des pays pauvres, en développement. Toutefois, dans le domaine de la recherche en nanotechnologie, les scientifiques et les ingénieurs des pays en développement ont apporté de remarquables contributions et se sont révélés très compétitifs dans la recherche. Plusieurs pays en développement, notamment le Brésil, la Chine (y compris Taiwan, Hong Kong et Macao), la Corée du Sud, l'Inde et Singapour ont introduit dans la recherche nanotechnologique des innovations qui ont permis de grands progrès, et les fonds alloués à ces fins par les gouvernements n'ont cessé d'augmenter. Si l'on en juge par de récentes statistiques sur leurs contributions à la nanotechnologie (statistiques basées sur le nombre de publications, de citations, de brevets déposés et sur leur impact économique), ces pays et d'autres pays en développement sont en train de réduire l'écart qui les séparait des pays les plus développés – dont l'Allemagne, le Canada, les États-Unis, la France, le Japon, les Pays-Bas et le Royaume-Uni qui tous, dans une certaine mesure, avaient ouvert la voie à la recherche en nanotechnologie. D'autres pays en déve-

loppement, notamment l'Argentine, l'Iran et la Thaïlande, ont également initié leur recherche en nanotechnologie grâce à des fonds alloués par leur gouvernement. La réduction des écarts concernant la nanotechnologie entre pays riches et pays pauvres est l'une des tendances les plus significatives et encourageantes dans la recherche scientifique.

3. Afin de préserver le progrès continu de la nanotechnologie, l'étude de réglementations destinées à assurer la sécurité dans les utilisations de la nanotechnologie et l'établissement de principes éthiques la concernant sont de toute urgence nécessaires.

Comme nous l'avons précédemment indiqué, les résultats de plusieurs études ont déjà fourni la preuve que certains nanomatériaux peuvent être nocifs pour les humains et les animaux (Radomski *et al.*, 2005 ; Ding *et al.*, 2005 ; Holmes, 2004 ; Oberdörster, 2004). Bien que, dans ce domaine, la recherche doive encore être conduite à grande échelle, ces premières découvertes montrent clairement qu'il est impératif de créer et mettre en place des directives concernant l'usage des nanotechnologies. De même, certaines applications de la nanotechnologie pouvant, comme nous l'avons vu, générer des problèmes éthiques, leurs conséquences éventuelles doivent être soigneusement examinées. Au vu des effets catastrophique sur les chercheurs en technologie nucléaire et de leur exposition aux radiations pendant les premiers stades de son développement, le moment est venu. Il serait plus sage de concevoir maintenant des directives éthiques pour la nanotechnologie que lorsqu'il sera trop tard.

BIBLIOGRAPHIE

- Bachilo, S. M. *et al.* 2002. "Structure-assigned optical spectra of single-walled carbon nanotubes". In : *Science*, Vol. 298, 2361.
- Chen, J. *et al.* 2005. "Bright infrared emission from electrically induced excitons in carbon nanotubes". In : *Science*, Vol. 310, 1171.
- Choi, Y. S. ; Cho, Y. S. ; Kang, J. H. ; Kim, Y. J. ; Kim, I. H. ; Park, S. H. ; Lee, H. W. ; Hwang, S. Y. ; Lee, S. J. ; Lee, C. G. ; Oh, T. S. ; Choi, J. S. ; Kang, S. K. ; Kim, J. M. 2003. "A field-emission display with a self-focus cathode electrode". In : *Applied Physics Letters*, Vol. 82, 3565-3567.

- Dillon, A. ; Jones, K. M. ; Bekkedahl, T. ; Kiang, C. ; Bethune, D. ; Heben, M. 1997. "Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes". In : *Nature*, Vol. 386, 377.
- Ding, L. ; Stilwell, J. ; Zhang, T. ; Elboudwarej, O. ; Jiang, H. ; Selegue, J. P. ; Cooke, P. A. ; Gray, J. W. ; Chen, F. F. 2005. "Molecular characterization of the cytotoxic mechanism of multiwall carbon nanotubes and nano-onions on human skin fibroblast". In : *Nano letters*, Vol. 5, 2448-2464.
- Dubrovinskaia, N. ; Dubrovinsky, L. ; Crichton, W. ; Langenhorst, F. ; Richter, A. 2005. "Aggregated diamond nanorods, the densest and least compressible form of carbon". In : *Applied Physics Letters*, Vol. 87, 83-106.
- Goodman, R. P. ; Schaap, I. A. T. ; Tardin, C. F. ; Erben, C. M. ; Berry, R. ; Schmidt, C. F. ; Turberfield, A. J. 2005. "Rapid chiral assembly of rigid DNA building blocks for molecular nanofabrication". In : *Science*, Vol. 310, 1661-1665.
- Heben, M. J. ; Dillon, A. C. ; Cheng, H. M. ; Dresselhaus, M. S. 2000. "Room-temperature hydrogen storage in nanotubes". In : *Science*, Vol. 287, 591.
- Holmes, B. 2004. "Buckyballs cause brain damage in fish". In : 29 March. *NewScientist.com*. <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn4825&print=true> (accès 20 décembre 2006)
- Kajiura, H. ; Tsutsui, S. ; Kadono, K. ; Kakuta, M. ; Ata, M. ; Murakami, Y. 2003. "Hydrogen storage capacity of commercially available carbon materials at room temperature". In : *Applied Physics Letters*, Vol. 82, 1105-1107.
- Ma, C. ; Wang, Z. L. 2005. "Road map for the controlled synthesis of CdSe nanowires, nanobelts, and nanosaws: A step towards nanomanufacturing". In : *Advanced Materials*, Vol. 17, 1-6. http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/paper/2005/05_AM_3.pdf (accès 20 décembre 2006)
- Ming, W. ; Wu, D. ; Bethem, R. Van ; With, G. de. 2005. "Superhydrophobic films from raspberry-like particles". In : *Nano Letters*, Vol. 5, 22-98. <http://nanotechweb.org/articles/news/4/10/16/1/raspberry> (accès 20 décembre 2006)
- Misewich, J. A. ; Martel, R. ; Avouris, P. ; Tsang, J. C. ; Heinze, S. ; Tersoff, J. 2003. "Electrically induced optical emission from a carbon nanotube FET". In : *Science*, Vol. 300, 783-786.

- Motorola Labs. 2003. Press release: "Motorola Labs announces significant progress in carbon nanotube technology". 1st July. http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail/0,1958,2981_2436_23,00.html (accès 20 décembre 2006)
- Oberdörster, E. 2004. "Manufactured nanomaterials (Fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass". In : *Environmental Health Perspectives*, Vol. 112, No. 10, 1058-1062.
- Radomski, A. ; Jurasz, P. ; Alonso-Escolano, D. ; Drews, M. ; Morandi, M. ; Malinski, T. ; Radomski, M. W. 2005. "Nanoparticle-induced platelet aggregation and vascular thrombosis". In : *British Journal of Pharmacology*, Vol. 146, 882-893.
- The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. 29 July. London, The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (accès 22 décembre 2006)
- Sample, I. 2001. "Small visions, grand design". In : *New Scientist*, No. 2311, 6 October, p. 30. <http://www.newscientist.com/article.ns?id=mg17223114.200&print=true> (accès 22 décembre 2006)
- Shirai, Y. ; Osgood, A. J. ; Zhao, Y. ; Kelly, K. F. ; Tour, J. M. 2005. "Directional control in thermally driven single-molecule nanocars". In : *Nano Letters*, Vol. 5, 2330-2334.
- Tang, Z. K. ; Zhang, L. ; Wang, N. ; Zhang, X. X. ; Wen, G. H. ; Li, G. D. ; Wang, J. N. ; Chan, C. T. ; Sheng, P. 2001. "Superconductivity in 4 Angstrom single-walled carbon nanotubes". In : *Science*, Vol. 292, 2362-2365.
- Tans, S. J. ; Verschueren, R. M. ; Dekker, C. 1998. "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube". In : *Nature*, Vol. 393, 49-52.
- Wang, F. ; Dukovic, G. ; Brus, L. E. ; Heinz, T. F. 2005. "The optical resonances in carbon nanotubes arise from excitons". In : *Science*, Vol. 308, 838-841.
- Zhang, W. 2003. "Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview". In : *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, 323-332.

Partie II

Enjeux éthiques

Chapitre 3

IDENTIFIER LES QUESTIONS ÉTHIQUES DES NANOTECHNOLOGIES

Joachim Schummer

Trois difficultés doivent être surmontées dans la discussion concernant l'éthique des nanotechnologies : le battage médiatique qui les entoure, leur définition encore floue et le fait qu'elles en soient à un stade initial.

Tout d'abord, la nanotechnologie est publiquement reconnue comme la révolution technologique du *xxi*^e siècle pouvant potentiellement apporter d'innombrables changements allant de la production industrielle à la conception que nous avons de nous-mêmes en tant qu'êtres humains, mais également des conséquences désastreuses pour l'humanité. Ces opinions, les unes optimistes et les autres pessimistes, issues de la science-fiction, ont été confortées, entre autres, par divers futurologues, concepteurs de software, conseillers en investissement, sectes religieuses et agences gouvernementales. Ce battage a créé autant d'espoirs et de craintes exagérés dans le public que d'inquiétudes d'ordre éthique ayant pour conséquence que la discussion concernant les implications sociétales et éthiques de la nanotechnologie s'en trouve maintenant influencée (Schummer, 2005). Tant de bruit rend difficile d'identifier et d'articuler ces questions d'un point de vue véritablement éthique.

Ensuite, les définitions de la nanotechnologie sont tout sauf claires. Elles sont si nombreuses qu'elles diffèrent largement d'un pays, d'une discipline et d'un public à l'autre. De plus, la création de programmes nationaux de nanotechnologies et les budgets conséquents qui les accompagnent font que toute discipline scientifique ou technique

peut profiter de ce nouveau créneau en ajoutant l'étiquette « nano » à sa recherche. Tout ce battage rend presque impossible de pouvoir identifier avec précision les questions éthiques les concernant.

Enfin, la majeure partie de ce qu'on appelle maintenant la « nanotechnologie » en est encore aux premiers stades de la recherche. Identifier les questions éthiques concernant des technologies à leur stade initial demanderait de prévoir ce que seraient les résultats de la recherche et ses développements, ce dont même les chercheurs sont incapables.

Ces trois obstacles incitent à aborder la nanotechnologie avec prudence, dans une plus large perspective et d'un point de vue critique. Avant d'aborder les questions éthiques qu'elle soulève, il est important de comprendre le contexte social dans lequel la nanotechnologie a émergé, y compris les traditions auxquelles elle se rattache, ce qu'elle signifie, qui elle concerne, ses défenseurs et ses adversaires et les travaux des chercheurs dans leurs laboratoires. Outre différents rapports gouvernementaux (notamment Rocco and Bainbridge, 2001 ; Commission Européenne, 2004 ; Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004 ; Paschen *et al.*, 2004), un groupe international comprenant des philosophes, éthiciens, historiens des sciences et spécialistes des sciences sociales a voulu situer la discussion des questions éthiques soulevées par la nanotechnologie dans un plus large contexte (par exemple, Fogelberg et Glimell, 2003 ; Baird *et al.*, 2004 ; Hayles, 2004 ; Schummer et Baird, 2006 ; Nordmann *et al.*, 2006). Exceptés certains, les savants sont en majorité d'accord sur le fait que la nanotechnologie s'est développée, plutôt que par bonds successifs, de manière continue sur plusieurs décennies et de façon non uniforme, qu'elle est beaucoup plus normale que certains le pensent et que le battage auquel elle donne lieu actuellement voile ses dimensions éthiques au lieu de les clarifier.

Ce chapitre analyse donc la compréhension que nous avons des questions éthiques les plus importantes concernant la nanotechnologie aujourd'hui. Il souligne les problèmes d'équité qu'elle pose à l'échelle mondiale, ainsi que sur ses effets potentiels sur les pays en développement (Schummer, 2006 ; 2007). En conclusion, quelques recommandations sont proposées sur la manière dont les gouvernements devraient traiter ces questions. Mais, tout d'abord, nous examinerons en quoi consiste la nanotechnologie.

DÉFINITION DE LA NANOTECHNOLOGIE

La nanotechnologie se définit de trois façons au moins. Chacune interprète de façon radicalement différente les questions éthiques la concernant. À ce jour, les définitions plus complexes ont malheureusement été négligées (Schummer *et al.*, 2003).

La définition nominale

Cette première définition dépend des conditions nécessaires et suffisantes – ce que les philosophes nomment une « définition nominale ». Selon cette définition servant de référence, la nanotechnologie consiste en la recherche et la manipulation d'objets matériels d'une taille allant de 1 à 100 nanomètres, destinés à découvrir des propriétés nouvelles et inventer de nouveaux instruments, appareils et fonctionnalités ne dépassant pas une taille de 1 à 100 nanomètres. Que cette définition ait été intentionnelle ou non, elle comprend toutes les sciences naturelles classiques et les disciplines techniques telles que la chimie, la science des matériaux, la physique des états solides, la pharmacie, la biologie chimique et moléculaire, l'ingénierie mécanique, électrique et électronique. La raison en est que presque toute substance est structurée à une échelle allant de 1 à 100 nanomètres, si bien qu'à cette échelle,

Tableau 3.1. Exemples de substances communes possédant une dimension cristallographique à la nanoéchelle

Substance	Formule scientifique	Longueur cristallographique de la cellule correspondante
Acide formique	CH_2O_2	1,02410 nm
Buckminsterfullerène	C_{60}	1,40410 nm
Glucose	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	1,48400 nm
Gypse	$\text{H}_4\text{CaO}_6\text{S}$	1,52010 nm
Vitamine C	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$	1,71000 nm
Alanine	$\text{C}_3\text{H}_7\text{ClNO}_2$	1,75900 nm
Sulfure	S_8	2,43360 nm
Vanilline	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$	2,50990 nm
Cholestérol	$\text{C}_{27}\text{H}_{46}\text{O}$	3,42090 nm
Vitamine D3	$\text{C}_{27}\text{H}_{44}\text{O}$	3,57160 nm
Pepsine	non spécifiée	29,01000 nm

sa structure détermine ses propriétés et, techniquement parlant, ses fonctionnalités. Le *tableau 3.1* dresse la liste des substances communes possédant une dimension cristallographique à nanoéchelle, y compris des éléments tels que le soufre, des substances ordinaires telles que le sucre (glucose) et cette très célèbre « nanosubstance » qu'est le buckminsterfullerène ou C_{60} . Cette définition à elle seule ne suffit pas pour poser de nouvelles questions éthiques. En effet, elle ne propose rien de neuf sur la nanotechnologie, si ce n'est son nom. En réalité, si les spécialistes de la plupart des sciences et des disciplines techniques rebaptisent leur recherche en y ajoutant le terme de « nano » – ce qui est juste selon cette définition nominale –, c'est que cette étiquette leur permet de trouver des fonds.

La définition téléologique ou « imaginaire »

La *définition téléologique* vient en deuxième position. Elle définit la nanotechnologie en fonction de ses objectifs. De manière très générale, ces objectifs peuvent être des valeurs telles que la santé, l'abondance et la sécurité, ou des valeurs relatives telles que « plus petit », « plus rapide », « plus solide » et « moins coûteux » – mais tout cela reste très flou. Depuis qu'Eric Drexler a introduit le terme de « nanotechnologie » en 1986, les définitions téléologiques ont été influencées par la technologie qu'il a imaginée, une technologie capable à l'avenir de changer radicalement tout, de la production industrielle aux conditions physiques, mentales et sociales de la vie humaine. Selon cette approche, la recherche actuelle relève de cette technologie si elle atteint ces buts. De nombreuses fictions de ce genre circulent, en particulier aux États-Unis et, plus récemment, en Europe. Les romans de Drexler, et ceux d'un certain nombre d'ingénieurs du software qui dominent le marché des livres de fiction inspirés par la nanotechnologie et racontent des histoires fantastiques de nanorobots polyvalents (capables de réparer de l'ADN pour rendre immortels des êtres vivants et de s'autorépliquer sans fin jusqu'à définitivement détruire toute vie intelligente sur notre planète), ont largement inspiré une abondante littérature de science-fiction (Napier, 2004). De plus, certaines agences américaines ont imaginé que la nanotechnologie pourrait transformer le monde « atome par atome », à l'instar de ce que Drexler avait imaginé, allant jusqu'à créer une transhumanité où « la fusion de la nanotechnologie avec la biotechnologie, la technologie de l'information et la science cognitive » permettrait d'« améliorer les capacités humaines ».

D'emblée, ces définitions futuristes de la nanotechnologie posent des problèmes éthiques. Cette approche soulève des émotions, des espoirs et des peurs, plutôt qu'elle n'offre des connaissances. Elle annonce les bienfaits que nous pourrions en espérer et les maux que nous devrions craindre. Selon ces définitions, les questions éthiques concernant la nanotechnologie auraient déjà toutes été identifiées par les auteurs de science-fiction et les futurologues, ne laissant ainsi aucune place aux éthiciens. Le problème est cependant que ces visions futuristes n'ont pas de fondement scientifique et, à tout le moins, qu'elles sont irréalisables dans un proche avenir. De plus, étant assez éloignées des activités réelles de la recherche et du développement en nanotechnologie, elles distraient l'attention, pourtant bien nécessaire, qui devrait être accordée aux véritables questions éthiques.

La véritable définition

La troisième définition de la nanotechnologie ou sa véritable définition se réfère à la liste des sujets de recherche habituellement classés sous le titre de nanotechnologie dans les programmes de recherche gouvernementaux, dans les centres de recherche, la presse et les conférences. Le *tableau 3.2* présente la liste des domaines de recherche les plus fréquemment mentionnés (voir aussi le *chapitre 2*).

Tableau 3.2.

Domaines de recherche habituellement en relation avec la nanotechnologie

<ul style="list-style-type: none"> • Microscopie à champ proche (SPM) • Recherche sur les nanoparticules • Matériaux nanostructurés, polymères et composites • Revêtements ultrafins • Catalyse hétérogène • Chimie supramoléculaire • Électronique moléculaire • Modélisation moléculaire • Lithographie de production de circuits intégrés (TI) • Recherche sur les semi-conducteurs et les points quantiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Calcul quantique • Systèmes microélectromécaniques (MEMS) • Cristaux liquides • Diodes émettant de la lumière (LEDs ou <i>light emitting diodes</i>) • Cellules solaires • Systèmes de stockage d'hydrogène • Détecteurs biochimiques • Délivrance ciblée de médicaments • Biotechnologie moléculaire • Génie génétique • Neurophysiologie • Ingénierie des cellules et tissus
---	---

Ces champs de recherche appartiennent à une large gamme de disciplines, comprenant la microscopie, la science et l'ingénierie des matériaux, la science des surfaces, la chimie organique, la chimie quantique, l'électrochimie, l'ingénierie électrique, la physique des solides, l'ingénierie mécanique et chimique, la biochimie, biologie moléculaire et la physiologie. Il est difficile de dire ce qu'elles ont en commun si ce n'est que toutes sont en rapport avec la nanotechnologie, car chacune comprend au moins l'un des derniers développements scientifiques et de l'ingénierie. De plus, contrairement à ce qui est souvent avancé, ces domaines ne présentent pas de caractère interdisciplinaire bien que cette liste ait, dans son ensemble, un caractère nettement multidisciplinaire (Schummer, 2004a). Il est donc approprié de parler de « nanotechnologies » au pluriel plutôt qu'au singulier.

Si l'on adopte cette définition, comme nous le ferons, la diversité des sujets fait de l'identification des questions éthiques un véritable défi. De plus, cette liste varie selon les pays et se modifie avec le temps, incluant ainsi de nouveaux domaines de recherche. Du point de vue de l'éthique, cela rend difficile d'identifier ce qui pourrait concerner de manière égale tous ces domaines. Par ailleurs, cette liste comprend de nombreux projets de recherche à long terme, notamment la recherche sur les semi-conducteurs, ainsi que l'ingénierie catalytique et le génie génétique. Certains ont déjà été discutés depuis longtemps du point de vue éthique. La discussion éthique concernant le génie génétique, maintenant appelé nanotechnologie, n'a donc guère de sens, c'est pourquoi il n'en sera pas question ici.

TYPOLOGIE DES QUESTIONS ÉTHIQUES

Étant donné le flou et la diversité du concept de nanotechnologie, ainsi que le battage entourant cette dernière, il semble approprié de diviser la discussion des questions éthiques la concernant en questions générales et en questions spécifiques. Ces dernières émergent des processus impliquant une recherche particulière, ses applications et produits – de la recherche en laboratoire à la production industrielle. Les questions générales concernent la façon dont les programmes de nanotechnologie dans leur ensemble sont créés, contrôlés et gérés, ainsi que celle dont ils se situent dans un plus large contexte scientifique et sociétal. Néanmoins, bien que ce chapitre traite essentiellement de questions éthiques, il est clair que de nombreuses nanotechnologies promettent d'intéressants résultats pour la société et qu'elles peuvent ainsi contri-

buer au bien-être de l'humanité dans son ensemble, à condition que les questions éthiques soient soigneusement prises en considération.

Les questions spécifiques

Bien que les six sujets discutés plus loin n'abordent pas de manière exhaustive la totalité des questions éthiques concernant les divers domaines des nanotechnologies, ce sont, de mon point de vue, les plus importants, car ils permettent d'y mettre un peu d'ordre en suivant une certaine logique. Tout d'abord, les nanotechnologies visant à améliorer à la fois des matériaux et des appareils, il est raisonnable d'ordonner la discussion en fonction des questions concernant la santé et l'environnement que soulèvent les nouveaux matériaux et les moyens de contrôle que ces nouveaux appareils rendent possibles. Ensuite, les applications médicales et militaires des nanotechnologies constituant les sujets de la recherche et du développement qui préoccupent le plus le public, mieux vaut les discuter séparément. Enfin, la dimension mondiale des nanotechnologies et leurs effets sur l'économie, en particulier celle des pays en développement, requièrent de discuter de l'équité entre les populations lorsqu'il s'agit des aspects matériels et intellectuels des nanotechnologies.

Questions éthiques concernant les nouveaux matériaux et leurs effets sur la santé et l'environnement

À ce jour, les questions éthiques les plus urgentes concernent les risques sanitaires et environnementaux qu'impliquent les nanoparticules, car toutes les directives nationales et transnationales comportent des manques importants. Depuis longtemps, l'on sait que des particules exactement de même composition chimique possèdent des propriétés différentes selon leur taille et leur forme à nanoéchelle – notamment leurs propriétés mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermodynamiques, chimiques, catalytiques et biologiques –, ainsi, évidemment, que la façon dont ces particules peuvent migrer dans un autre milieu en traversant des membranes biologiques. De plus, si ce phénomène peut s'expliquer du point de vue théorique, il est parfois difficile de le prédire de manière concrète grâce à la mécanique quantique, car la surface et la masse des atomes possèdent des structures électroniques différentes – et plus petite est la particule, plus élevé est le nombre d'atomes à sa surface. Toutefois, en contradiction totale avec les connaissances scientifiques actuelles, les directives dont font l'objet les produits chimiques,

les produits de consommation et la sécurité du travail ne tiennent pas compte des propriétés concernant la taille – et la forme – mais seulement de leur composition chimique. Cela signifie, par exemple, qu'une substance peut réussir les tests de toxicité des nouveaux produits chimiques s'ils sont effectués sur de grandes particules, alors que les petites particules de la même substance sont toxiques.

De toute évidence, les nanoparticules ne sont pas nouvelles. Elles se trouvent naturellement dans les cendres volcaniques et les aérosols ; certaines résultent aussi d'activités humaines telles que la combustion et l'abrasion. Toutefois, les activités de R&D concernant les nanoparticules et les nanomatériaux exploitent maintenant de manière systématique leurs propriétés qui dépendent de leur taille et de leur forme dans le but de produire industriellement des matériaux améliorés. Pour une large part, cela explique ce que l'on entend par « la prochaine révolution industrielle ». Non seulement de nouveaux matériaux vont résulter de leur production, distribution, consommation et de leurs techniques abrasives, mais encore il s'ensuivra une exposition encore jamais vue aux nanoparticules, à la fois en quantité et du point de vue chimique. Ces nouvelles perspectives pour l'industrie et les risques sanitaires et environnementaux sont inséparables. C'est pourquoi il est profondément irresponsable de faire l'éloge de ces innovations tout en en négligeant les risques.

Certains produits fondés sur l'utilisation des nanoparticules et des composites nanostructurés étant déjà sur le marché et bien d'autres ne tardant pas à les y rejoindre, il est urgent de définir de nouvelles normes destinées à tester la sécurité que l'utilisation de ces produits et leur abrasion présentent, afin que ces normes servent à établir de nouvelles directives. De plus, la recherche sur la toxicologie des nanoparticules, bien trop longtemps négligée, et celle sur les méthodes permettant de produire sans risque des nanoparticules par le traitement des surfaces ou leur encapsulation sont également devenues des urgences.

Questions éthiques concernant le contrôle des nouveaux appareils

De la lithographie à l'électronique moléculaire, nombre de nanotechnologies visent à rendre les ordinateurs plus rapides et à réduire leur taille. De plus, les appareils permettant de détecter et d'émettre des signaux, les équipements destinés à capter et emmagasiner l'énergie solaire, ou encore à produire de processus électriques et chimiques sont maintenant miniaturisés à l'échelle du micromètre. Dans leur ensemble,

ces technologies constituent la boîte à outils de la radio-identification (ou RFID) et des machines à calculer omniprésentes. De nombreuses nanotechnologies enrichissant maintenant nos ressources techniques sont désignées comme des « technologies capacitantes ». Ne serait-ce qu'en tant que telles, elles soulèvent des questions éthiques, y compris les instruments et appareils qui les accompagnent. Bien que le « nano-robot » capable de tout accomplir, ou presque, relève de la science-fiction et n'existera probablement jamais, des appareils multifonctionnels existent déjà à des échelles variant du millimètre au micromètre grâce à divers types de nanotechnologies.

Les progrès technologiques continus, notamment la miniaturisation, ne soulèvent habituellement pas de questions éthiques, excepté lorsqu'ils dépassent les seuils dont les humains sont capables. Par exemple, en dépassant les seuils de la perception sensorielle humaine, certains appareils peuvent produire à notre insu certaines modifications, s'immiscer dans notre vie privée, ou encore permettre l'installation d'une surveillance indétectable. À un certain niveau de complexité, divers appareils peuvent prendre de manière quasi autonome les décisions que nous pensons être pourtant celles d'êtres humains moralement et juridiquement responsables. D'autres appareils aussi peuvent interagir les uns avec les autres à un niveau tel que leur comportement collectif est imprévisible et incontrôlable.

Tous ces exemples soulèvent de nouvelles questions éthiques, notamment si ces nouveaux appareils peuvent devenir incontrôlables et nous être nuisibles sans que quiconque puisse en être tenu pour responsable. Pour répondre à cette nouvelle question concernant la responsabilité, il est nécessaire d'établir des directives très précises qui définissent le niveau de contrôle humain requis et l'étendue des tâches que l'on peut autoriser à être exécutées par ces nouveaux appareils – et de préciser clairement les responsabilités de leurs producteurs et de leurs utilisateurs. De plus, le développement de ces nouveaux appareils doit s'accompagner de méthodes et d'instruments permettant de les détecter et de les désactiver.

Questions éthiques concernant les applications militaires des nanotechnologies

Il semble indiqué de traiter séparément les aspects militaires, car une importante partie des budgets gouvernementaux consacrés à la R&D en nanotechnologies leur est consacrée, à tout le moins dans certains

pays. Les craintes habituellement exprimées par le public concernent le développement d'armes utilisant les nouvelles nanotechnologies, en particulier des armes chimiques et biologiques, ainsi que la miniaturisation et l'automatisation de systèmes d'attaque et de contrôle qui pourraient non seulement constituer de nouvelles menaces et saper les conventions internationales, mais initier aussi une nouvelle escalade militaire. Toutefois, la majeure partie de la recherche militaire étant tenue secrète, de nombreuses craintes ne sont que spéculations dont la science-fiction, une fois encore, est la source d'inspiration. Par ailleurs, parce que cette situation affaiblit la gouvernance démocratique de la technologie et la confiance du public, une question éthique importante est le fait que certains aspects de la recherche sont de plus en plus classés comme « nanotechnologies » et donc tenus hors du contrôle du public, devenant ainsi des sujets de craintes publiques.

De plus, les intérêts militaires dans la R&D ont orienté les objectifs des nanotechnologies dès leur création, ce qui n'est pas sans effet sur les valeurs humaines fondamentales de la société civile. La convergence précise des nanotechnologies entre les sciences biologiques, les sciences cognitives et celles de l'information pour « améliorer les capacités humaines » (Roco et Bainbridge, 2002) se fonde sur des idées très particulières de ce que signifie l'amélioration humaine. Accroître les capacités physiques, la protection des vêtements contre les balles et les capacités sensorielles aux infrarouges ou autres, accroître les capacités intellectuelles grâce à des interfaces entre le cerveau humain et l'ordinateur, et ainsi de suite, peut fort bien améliorer aussi les performances militaires des soldats. Toutefois, bien que ces objectifs puissent satisfaire certains individus, les sociétés humaines reposent sur des valeurs et des qualités humaines différentes de celles que nécessitent des opérations militaires. C'est pourquoi l'intrusion des valeurs militaires dans la société civile est une distorsion néfaste qui dégrade les valeurs morales et sociales, ainsi que les capacités humaines correspondantes dont dépend toute société civile.

Enfin, il est bien possible que les projets de R&D visant à « l'amélioration humaine » soit d'abord testés sur des soldats parce que ces derniers sont des cibles et que leurs droits sont limités. Les expérimentations humaines reposant sur des interfaces cerveau-ordinateur sont particulièrement risquées, car elles peuvent causer des dommages physiologiques et psychologiques à long terme, au contraire de celles effectuées sur des animaux.

Questions éthiques concernant les applications biomédicales des nanotechnologies

Si nous laissons de côté les romans de science-fiction, leurs robots manipulateurs d'ADN, la conquête de l'immortalité et la course à une « superintelligence », les applications médicales des nanotechnologies suivent une voie plutôt conventionnelle. Du transport ciblé de remèdes et des détecteurs biochimiques pour effectuer des diagnostics jusqu'aux diagnostics et thérapies génétiques, toutes ces découvertes ont donné lieu à des discussions éthiques depuis un certain temps et, pour l'essentiel, elles sont contrôlées par des lois nationales. Par ailleurs, ces fictions se propagent en raison de la compétition pour trouver des fonds exigeant une certaine publicité et qui pose de sérieuses questions éthiques, car c'est abuser ainsi, de manière irresponsable, de patients espérant qu'ils pourraient guérir d'une grave maladie grâce à un miracle technologique.

Deux aspects de la « nanomédecine » accordent cependant plus d'importance encore aux défis posés au système médical. (Certains autres aspects seront discutés dans le chapitre suivant.) Le premier concerne le développement de « boîtes noires » utilisées pour l'autodiagnostic et l'automédication automatique – par exemple, des détecteurs biochimiques mesurant dans le sang des données ensuite traitées de manière électronique pour calculer les doses médicales requises pour une injection automatique. Bien évidemment, ce genre de système médical automatique soulève la question de la responsabilité relative aux appareils et à leurs défauts. De plus, cette question est un défi posé au système médical, car elle l'oblige à redéfinir les compétences, les tâches et les responsabilités des médecins et autres personnels soignants qui, dans ce cas, sont littéralement remplacés par des robots.

Un second aspect de la nanomédecine provient de la pression plus forte exercée sur le système médical qui l'entraîne à dériver des soins cliniques vers l'amélioration des conditions physiques des patients au-delà de ce qui est nécessaire pour leur santé. Bien que cet aspect ne soit que vaguement abordé, il fait partie de l'agenda politique, à tout le moins dans certains pays désireux que les nanotechnologies se conjuguent à d'autres technologies destinées à « l'amélioration des capacités humaines ». Excepté quelques domaines voisins tels que la chirurgie esthétique et le dopage des athlètes, les médecins et les chercheurs n'ont jamais eu pour tâche d'« améliorer » leurs congénères, alors que l'industrie pharmaceutique n'a cessé de se concentrer sur de soi-disant

« produits pour le bien-être » au cours des deux dernières décennies. Certes, l'idée d'« améliorer » sous-tend pour l'essentiel toute discussion éthique médicale, dont le premier devoir a toujours été de ne pas nuire, ni donc de faire souffrir à moins que cela ne soit dans le but de restaurer la santé. Quels risques sont-ils acceptables pour des personnes soumises à des expérimentations cliniques et pour des patients sous traitement si le résultat n'en est pas la santé, mais l'« amélioration » ? De plus, les ressources de la recherche médicale étant limitées, le « business de l'amélioration » pourrait absorber des ressources médicales qui ne seraient alors plus disponibles pour la recherche visant à soigner des maladies graves. Sans contre-mesures efficaces, le déséquilibre en résultant se fera particulièrement aux dépens des pauvres, aux niveaux nationaux et internationaux.

Questions éthiques concernant les matériaux des nanotechnologies

Les nanotechnologies étant associées à la miniaturisation, il existe une tendance générale à négliger le fait que la production industrielle qui en est issue consomme chaque année, au bout du compte, des tonnes de ressources matérielles. Leur consommation soulève deux questions éthiques. Tout d'abord, la consommation de matériaux devrait se conformer aux principes du développement durable afin d'éviter que les générations futures ne souffrent pas d'un manque de ressources, ni d'une énorme accumulation de déchets inutilisables. Pour ne pas être nuisibles, il faut éviter que les nanotechnologies reposent sur l'utilisation de ressources matérielles essentielles et, lorsque c'est le cas, les remplacer par d'autres – par exemple, de nombreuses nanotechnologies utilisent des éléments rares, notamment les technologies des céramiques nanostructurées et de l'optoélectronique. Cela signifie aussi que les produits provenant de ressources rares devraient être facilement recyclables. Ainsi, l'ingénierie des matériaux ayant actuellement une forte tendance à travailler sur les composites nanostructurés pose un important problème, car ces composites sont particulièrement difficiles à recycler.

Ensuite, la seconde question éthique concernant la consommation des ressources matérielles est particulièrement importante pour les pays en développement. La plupart des ressources les plus rares dans le monde, en particulier les métaux, se trouvent dans les pays en développement dont l'économie dépend essentiellement de l'industrie minière et de l'exportation de ces matériaux vers les pays industrialisés. Pendant longtemps, l'on a cherché à découvrir des substituts pour remplacer des

ressources matérielles chères, naturelles ou étrangères. Par exemple, les teintures synthétiques ont remplacé les naturelles à la fin du XIX^e siècle, l'ammoniac synthétique a remplacé le salpêtre naturel du Chili dans les fertilisants du début du XX^e siècle et les plastiques ont remplacé le bois et les métaux depuis le milieu du XX^e siècle. Tous ces changements ont eu des effets dévastateurs sur les économies locales et nationales.

Il est clair que de nombreuses nanotechnologies suivent cette tendance. Par exemple, à cause de leurs extraordinaires propriétés électriques, l'on pense que les nanotubes de carbone remplaceront les métaux possédant une conductibilité élevée (cuivre, argent, or) dans les appareils électroniques. Certains semi-conducteurs organiques vont remplacer divers éléments semi-conducteurs, notamment le gallium, le germanium, l'indium, le cadmium, le sélénium, l'arsenic et l'antimoine. Quelques exemples illustrent la dimension économique de ces processus de substitution (USGS, 2006 ; Schummer, 2007). Le marché mondial du tungstène, ressource la plus utilisée pour les matériaux ultrasolides (carbure et nitrure de tungstène), s'élevait à \$E.-U. 1,35 milliard en 2005. Environ 90 % de la production minière et des ressources mondiales en tungstène se trouvent en Chine, alors que la recherche actuelle en céramique vise précisément à lui trouver un substitut. Les catalyseurs utilisés dans la raffinerie du pétrole, l'industrie chimique et la réduction de la pollution automobile reposent en majorité sur des métaux précieux tels que le rhénium (pour un total de \$E.-U. 47 millions, provenant principalement du Chili, du Kazakhstan et du Pérou), le palladium (\$E.-U. 1,3 milliard, venant en majorité de l'Afrique du Sud et de la Russie) et le platine (\$E.-U. 6,2 milliards, provenant pour l'essentiel de l'Afrique du Sud). La catalyse nanotechnologique vise précisément à trouver des substituts ou, du moins, à réduire les quantités dans lesquelles ces métaux sont ainsi utilisés. Par ailleurs, certaines nanotechnologies créent aussi de nouvelles demandes de matériaux. Ainsi, l'optoélectronique (composants de sources lumineuses, écrans à cristaux liquides, cellules solaires, etc.) utilise des films d'oxyde d'indium et d'étain, ce qui a récemment créé une énorme demande d'indium dont les mines se trouvent surtout dans des pays industrialisés tels que le Japon, le Canada et la Belgique et, plus récemment, la Chine. Son prix s'est vertigineusement élevé sur le marché mondial et son marché représente actuellement \$E.-U. 370 millions par an.

Le succès des romans de science-fiction a conduit à passer totalement sous silence les effets potentiellement drastiques des nano-

technologies sur les économies des pays en développement, car ils ont accru l'écart entre pays riches et pays pauvres. Il est donc nécessaire d'évaluer au plus vite les effets économiques de chaque nanotechnologie dans le monde afin que les pays en développement affectés en tiennent compte par avance dans leurs programmes économiques et leur R&D. Bien qu'il soit difficile de prodiguer des conseils spécifiques sans avoir procédé à des évaluations précises, deux recommandations générales peuvent maintenant être adressées aux pays en développement possédant ces ressources matérielles. Tout d'abord, ces pays devraient concentrer leurs efforts sur la R&D en utilisant leurs propres ressources nationales. Ensuite, ils devraient rechercher les substituts technologiques qui pourraient remplacer les technologies dépendant maintenant de leurs propres ressources afin de réduire les effets économiques désastreux que ces substituts pourraient avoir. Par exemple, l'Afrique du Sud, qui possède 89 % des ressources mondiales en platine, pourrait rechercher de nouvelles technologies utilisant le platine et de nouveaux catalyseurs destinés à remplacer les actuels catalyseurs à base de platine afin d'éviter une catastrophe économique si d'autres pays découvrent un substitut avant elle.

Questions éthiques concernant les droits de propriété des nanotechnologies

Bien qu'aucune mesure spécifique n'existe à ce sujet, les nanotechnologies émergent tandis que les droits de propriété intellectuelle sont en train d'être modifiés dans les pays occidentaux et que ces changements ont des effets secondaires négatifs sur les pays en développement (Sampat, 2003). Deux tendances importantes existent à ce sujet. D'une part, les critères concernant les brevets pouvant ou non être déposés couvrent sans cesse de plus en plus de choses, si bien que même les connaissances et les banques de données peuvent être maintenant protégées. D'autre part, de nouvelles directives, à la fois aux États-Unis et dans certains pays européens, exigent que les chercheurs universitaires communiquent leurs inventions et leurs connaissances brevetables à leur administration dans de soi-disant « rapports confidentiels » avant leur publication. Ces administrations décident alors quels brevets déposer afin d'en tirer des revenus. Dans les universités américaines, les dépôts de brevets se sont élevés de 30 à 50 % vers la fin des années 1990, ce qui a augmenté l'ensemble des revenus provenant des brevets déposés de \$E.-U. 200 millions, en 1991, à \$E.-U. 1,4 milliard, en 2004 (AUTM, 2006).

À cause de ces deux tendances, les connaissances produites par les universités, auparavant publiées dans des revues scientifiques pour entrer dans le domaine public, sont maintenant de plus en plus protégées par des brevets sur le marché. Alors que cela a favorisé le transfert technologique des universités vers des entreprises nationales et créé de nouvelles sources de revenus pour ces universités, la complexité des réglementations concernant les brevets a rendu le développement industriel beaucoup plus onéreux et compliqué. En effet, chaque élément, même infime, des connaissances essentielles à l'ingénierie doit maintenant être acheté. Les pays en développement ayant bénéficié des connaissances entrées dans le domaine public et disposant de moins de moyens pour acheter des brevets sont ceux qui souffrent le plus de cette nouvelle situation. C'est pourquoi les politiques des pays développés concernant les droits soutenant leurs propres industries accroissent encore l'écart technologique entre pays développés et pays en développement.

Questions éthiques d'ordre général

Formation éthique des étudiants en sciences

Dans la plupart des pays occidentaux, les programmes de recherche sur les nanotechnologies ont été financés par le transfert des fonds alloués à la recherche théorique vers la recherche appliquée ce qui, soit dit en passant, est une tendance à long terme. Ce glissement ayant modifié les enseignements, du moins au niveau de la licence, pour les orienter vers les sciences appliquées et l'ingénierie, il devient de plus en plus nécessaire d'intégrer l'éthique à l'enseignement des sciences. Alors qu'une formation à l'éthique est maintenant obligatoire pour les étudiants en ingénierie dans de nombreux pays, ce n'est pas le cas dans l'enseignement des sciences parce que les scientifiques sont encore supposés pratiquer une recherche éthiquement « neutre ». Les nanotechnologies induisant ce changement dont elles dépendent, tous les enseignements dispensés dans des domaines en relation avec les technologies devraient inclure une formation à l'éthique.

Gouvernance technologique

Dans de nombreux pays, les récentes initiatives nationales concernant les nanotechnologies illustrent une tendance des politiques scientifiques nationales et internationales qui peut poser problème et saper les modèles démocratiques raisonnés des prises de décision. L'utilisation, maintenant en vogue, du terme de « nanotechnologie » tend à négliger la

diversité des technologies désignées par ce terme, ainsi que le problème soulevé par celles qui devraient être encouragées ou non. Au lieu d'évaluer les pour et les contre de chacune d'entre elles, des programmes gouvernementaux ont généré, à grand renfort de publicité, des espoirs non fondés dans « la prochaine révolution industrielle ». Les allusions multiples à la science-fiction et à la futurologie ont suscité chez le public des espoirs et des craintes exagérés qui sapent l'évaluation raisonnée des technologies. Au lieu de favoriser la participation citoyenne aux prises de décision concernant les politiques scientifiques, de nombreux pays prennent le train en marche, sans réels débats, de peur de le rater.

Équité mondiale

Au cours des deux derniers siècles, la technologie a joué un rôle majeur dans l'économie internationale en favorisant la croissance économique, mais aussi en renforçant l'écart économique entre pays riches et pays pauvres. Les nanotechnologies émergeant alors que la mondialisation économique s'accroît et que les pays développés et les pays en développement consacrent de très importants efforts en R&D, il devient impératif d'évaluer chacune des nanotechnologies en fonction de leurs effets sur le statut économique des pays en développement. Ces effets peuvent être positifs ou négatifs pour ces pays, qu'ils consomment ou produisent des produits nanotechnologiques, leurs matériaux et même leurs déchets. Les questions concernant les ressources matérielles et les droits de propriété intellectuelle, en particulier dans ces pays, ont déjà été discutées, mais beaucoup d'autres doivent être encore analysées (Schummer, 2007).

RECOMMANDATIONS

Les questions éthiques se posent lorsque le développement de nouvelles technologies ou celui de leurs futures applications et produits sont en conflit avec les normes éthiques d'une société. Bien que les gouvernements ne puissent contrôler ces normes, il est de leur ressort de réduire ces conflits. Ils peuvent le faire de quatre façons : promulguer des directives destinées à protéger la population de risques éventuels ; soutenir la recherche en fournissant les connaissances suffisantes pour des prises de décision raisonnées ; informer et éduquer le public sur les pour et les contre de la technologie incriminée ; et, enfin, impliquer les citoyens dans la gouvernance des technologies afin de réduire ces conflits. En conclusion, j'aimerais recommander aux gouvernements

de prendre chacune de ces quatre mesures pour résoudre les problèmes éthiques discutés plus haut.

Les directives nécessaires

Directives concernant les nanoparticules

À ce jour, établir de nouveaux standards et directives toxicologiques des nanoparticules afin de réduire les risques sanitaires et environnementaux s'est avéré un échec et cela reste le problème éthique qui doit être résolu de toute urgence. Il est conseillé aux gouvernements de suivre le principe de précaution et de promulguer des directives avant que la production industrielle et la mise en vente des nanoparticules ne prennent place afin de protéger leurs travailleurs, leurs consommateurs, leur population dans son ensemble et leur milieu naturel. Ne pas le faire non seulement entraîne des risques sanitaires et environnementaux, mais encore met en danger leurs politiques scientifiques, car, dès le premier accident toxicologique, tout ce qui sera en relation avec la nanotechnologie se heurtera à une grande hostilité publique. En ce cas, les résultats positifs des nanotechnologies ne seraient guère compris et acceptés du grand public et les importants investissements gouvernementaux deviendraient un non moins important gaspillage des fonds public. Les problèmes concernant les risques sanitaires et environnementaux devant trouver de toute urgence des réponses, les gouvernements devraient dès à présent se mettre à travailler sur des directives au niveau national, sans oublier toutefois le niveau international où les prises de décision sont beaucoup plus lentes.

Directives concernant les machines et appareils

Devenant de plus petite taille, plus performantes et mieux intégrées dans des systèmes, de nouvelles machines accomplissent des tâches de manière de plus en plus autonome sans que l'on puisse le prévoir ou le détecter. Cela sape les systèmes moraux et juridiques fondés sur l'idée que seuls les humains prennent des décisions autonomes dont ils sont, de plus, tenus pour responsables. Afin d'éviter l'érosion du concept de responsabilité, fondement de la loi et de l'éthique, et afin de maintenir un contrôle humain, des directives sont nécessaires pour clairement définir ce qui est nécessaire et l'étendue des tâches accomplies par des instruments et appareils, ainsi que les responsabilités précises de leurs producteurs et utilisateurs. Plus une machine est puissante et plus dangereuses deviennent ses utilisations malintentionnées ou illégales.

C'est pourquoi, tout en préparant ces directives, il est nécessaire de considérer s'il faut et comment limiter la mise à disposition publique de ces machines.

Directives concernant l'« amélioration »

Bien que les seuils de souffrance autorisés diffèrent d'une société à l'autre, des limites éthiques fondamentales existent ; elles sont fondées sur des droits humains qui sont protégés par la loi dans tous les pays. En premier lieu, aucune personne ne devrait être soumise à des expérimentations consistant en une « amélioration » artificielle des capacités humaines, quel qu'en soit l'attrait et quelles que soient les pressions sociales ou psychologiques. Ensuite, aucune expérimentation de ce type ne devrait impliquer des handicapés mentaux, ou encore des personnes qui ne sont pas pleinement conscientes des risques. Enfin, ce type d'expérience ne devrait comporter aucun risque pour toute personne autre que le patient. Cette clause, par exemple, élimine certaines expériences en neurochirurgie où des personnes autres que le patient encore risqueraient de subir des dommages cérébraux. De plus, même si ces directives permettent jusqu'à un certain point ces expériences, elles devraient veiller à ce que des moyens destinés au système de santé publique ne soient captés.

Directives concernant les droits de propriété intellectuelle

L'équité qu'il est nécessaire d'établir dans le monde demande que soient inversées les deux tendances concernant les droits de propriété intellectuelle qui, comme cela a été déjà mentionné, privent le domaine public des connaissances provenant de la recherche. Afin de donner aux pays en développement une chance équitable dans le domaine de R&D des nanotechnologies, les connaissances essentielles de l'ingénierie qui sont financées par l'argent public devraient de nouveau entrer dans le domaine public. Cette réversion demandera sans doute à la fois une action au niveau national dans les pays en développement et des accords au niveau international. De plus, les connaissances sur ces technologies devraient être encadrées par des régulations internationales facilitant leur transfert vers les pays en développement afin de répondre à leurs besoins spécifiques.

Les besoins de la recherche

La recherche intégrée

Une grande partie de la R&D en nanotechnologie semble actuellement répéter les erreurs commises au xx^e siècle, car elles se centrent beaucoup trop sur des objectifs technologiques limités et ne tiennent pas compte de plus vastes problèmes, notamment des effets secondaires involontaires, ni des mesures techniques et politiques destinées à les éviter. C'est pourquoi une recherche mieux intégrée est vraiment nécessaire. Elle devrait inclure la recherche en éthique et en sciences sociales et humaines si l'on veut mieux comprendre les effets, volontaires ou non, des technologies sur la société, et elle devrait se conjuguer à une recherche préventive et orientée par objectifs. Par exemple, la recherche sur les matériaux devrait aller de pair avec la recherche sur la toxicologie des nanoparticules et leur encapsulation. Le développement de nouveaux appareils devrait s'accompagner de celui de méthodes permettant de les détecter, les désactiver et même les détruire. Le développement de nouveaux matériaux devrait non seulement se centrer sur des performances techniques, mais encore examiner dès le début comment les harmoniser avec les impératifs du développement durable, notamment la disponibilité des ressources, des moyens de les recycler et des effets d'une demande accrue de ces matériaux sur l'économie mondiale.

La recherche centrée sur les besoins sociétaux

Le battage actuel autour des nanotechnologies a créé une situation dans laquelle tout ce qui porte leur étiquette semble important et permet à la recherche de bénéficier de financements toujours plus consistants. Toutefois, il est désirable, pour diverses raisons éthiques, que l'argent public soit investi dans une recherche répondant aux besoins spécifiques de la société. Par exemple, l'on peut se demander si une partie de la recherche militaire est réellement plus nécessaire que celle destinée à des fins civiles et si l'« amélioration » des capacités humaines est plus importante que le traitement de maladies graves. Les pays en développement, aux maigres budgets de recherche, devraient tout particulièrement être conseillés pour soigneusement examiner les nanotechnologies qu'ils devraient sélectionner pour leur R&D afin de répondre à des besoins publics spécifiques et conformes à leurs moyens (voir aussi le chapitre 6). Par exemple, les pays confrontés à des problèmes d'eau douce pourraient se centrer sur les nouvelles techniques de traitement des

eaux, ceux bénéficiant d'un fort ensoleillement pourraient investir dans la R&D sur les piles photovoltaïques plutôt que d'importer de l'énergie ou des technologies énergétiques et les pays possédant des ressources en matériaux devraient centrer leurs efforts sur des technologies utilisant ces mêmes ressources ou leurs substituts.

Les besoins dans l'enseignement et les orientations

L'excitation est l'ennemie de l'évaluation raisonnée et de la gouvernance des technologies. Dans nombre de pays développés, le battage autour des nanotechnologies a entraîné des attitudes non critiques, le support aveugle de n'importe quelle recherche portant la « nano-étiquette », ainsi que des espoirs et des craintes exagérés de la part du public, inspirés de la science-fiction plutôt que de réels projets de R&D. À ce train, un autre danger est que, dans les pays en développement, la nanotechnologie devienne le symbole de la modernité et qu'ainsi l'évaluation des nanotechnologies se transforme en un débat symbolique opposant modernité et tradition.

Chaque pays serait donc bien avisé de prendre les mesures nécessaires pour éviter et réduire une telle excitation. L'éducation publique doit faire face à ce problème en expliquant la diversité des nanotechnologies et en soulignant les différences existant entre la science-fiction et de véritables projets de R&D. De plus, il faudrait que des normes éthiques soient imposées dans les enseignements scientifiques et en ingénierie afin que les étudiants aient une formation éthique leur permettant d'analyser, évaluer et transmettre les dimensions éthiques des technologies.

Les technologies qui exercent une influence de plus en plus importante sur la société et qui déterminent ainsi notre style de vie, la conception des projets technologiques, leur support, leurs orientations et les directives les concernant – c'est-à-dire la gouvernance technologique – constituent maintenant une partie essentielle de la politique. Les sociétés démocratiques ont besoin de s'adapter à cette évolution. Au lieu de laisser des experts ou des administrateurs prendre seuls les décisions critiques, la gouvernance technologique nécessite une solide base démocratique comprenant la participation citoyenne en amont des projets, l'identification des besoins sociétaux et des solutions technologiques réalisables. Démocratiser la gouvernance technologique est la meilleure façon d'assurer que les technologies émergentes soient développées en accord avec les principes éthiques d'une société.

BIBLIOGRAPHIE

- Association of University Technology Managers (AUTM). 2006. *AUTM Licensing Survey: FY 2004*. Northbrook, IL : AUTM.
- Baird D. ; Nordmann, A. ; Schummer, J. (Eds.). 2004. *Discovering the Nanoscale*. Amsterdam : IOS Press.
- Drexler, K. E. 1986. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. New York : Anchor/Doubleday.
- European Commission, Community Health and Consumer Protection. 2004. *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis*. Based on a workshop in Brussels, 1-2 March.
http://ec.europa.eu/health/ph_risk/documents/ev_20040301_en.pdf (accès 20 décembre 2006)
- Fogelberg, H. ; Glimell, H. 2003. *Bringing Visibility to the Invisible: Towards A Social Understanding of Nanotechnology*. Göteborg : Göteborg University Press. http://www.sts.gu.se/publications/STS_report_6.pdf (accès 2007)
- Hayles, N. K. (Ed.). 2004. *Nanoculture: Implications of the New Technoscience*. Bristol : Intellect Books.
- Napier, A. S. 2004. *Nanotechnology in science fiction*.
<http://www.geocities.com/asnapier/nano/n-sf/books.html> (accès 2007)
- Nordmann, A. ; Schummer, J. ; Schwarz, A. (Eds.). 2006. *Nanotechnologien im Kontext: Philosophische, ethische und gesellschaftliche Perspektiven*. Berlin : Akademische Verlagsgesellschaft.
- Paschen, H. ; Coenen, C. ; Fleischer, T. ; Grünwald, R. ; Oertel, D. ; Revermann, C. 2004. *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*. Berlin : Springer.
- Roco, M. C. ; Bainbridge, W. S. (Eds.). 2001. *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Proceedings of a workshop organised by the National Science Foundation, 28-29 September 2000. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- (Eds.). 2002. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and the Cognitive Science*. Arlington, VA : National Science Foundation.
- The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and*

- Uncertainties*. 29 July. London : The Royal Society & the Royal Academy of Engineering.
<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (accès 22 décembre 2006)
- Sampat, B. N. 2003. *Knowledge Flows, Innovation, and Learning in Developing Countries*. 39-81. Temple, AZ : CSPO.
http://www.cspo.org/home/cspoidea/know_flows/Rock-Vol1-2.PDF (accès 20 décembre 2006)
- Schmid, G. ; Decker, M. ; Ernst, H. ; Fuchs, H. ; Grünwald, W. ; Grunwald, A. ; Hofmann, H. ; Mayor, M. ; Rathgeber, W. ; Simon, U. ; Wyrwa, D. 2003. *Small Dimensions and Material Properties: A Definition of Nanotechnology*. Bad Neuenahr : Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen.
- Schummer, J. 2004a. "Multidisciplinarity, interdisciplinarity, and patterns of research collaboration in nanoscience and nanotechnology". In : *Scientometrics*, Vol. 59, 425-465.
- . 2004b. "Societal and ethical implications of nanotechnology: Meanings, interest groups, and social dynamics". In : *Techné: Research in Philosophy and Technology*, Vol. 8, No. 2, 56-87.
- . 2005. "Reading nano: The public interest in nanotechnology as reflected in purchase patterns of books". In : *Public Understanding of Science*, Vol 14, 163-183.
- . 2006. "Cultural diversity in nanotechnology ethics". In : *Interdisciplinary Science Reviews*, Vol. 31, 217-230.
- . 2007. "The impact of nanotechnologies on developing countries". In : Allhoff, F. ; Lin, P. ; Moor, J. ; Weckert, J. (Eds.), *Nanoethics: Examining the Societal Impact of Nanotechnology*. Hoboken, NJ : Wiley.
- Schummer, J. ; Baird, D. (Eds.). 2006. *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*. Singapore : World Scientific Publishing.
- U.S. Geological Survey. 2006. *Mineral Commodity Summaries 2006*. Washington, DC : USGS.
<http://minerals.ugs.gov/minerals/pubs/mcs/2006/mcs2006.pdf> (accès 20 décembre 2006)

Chapitre 4

LES QUESTIONS ÉTHIQUES EN NANOMÉDECINE

Bert Gordijn

Le terme de « nanotechnologie » couvre l'étude, la création et l'application de structures possédant au moins une dimension de 100 nm ou moins. Un objet ne possédant aucune dimension à cette échelle est exclu du domaine des nanotechnologies. Cette définition semble être adoptée par la majorité. C'est aussi celle utilisée par le programme de financement des États-Unis intitulé « Initiative nationale en nanotechnologie » (*National Nanotechnology Initiative*, NNI).

Des rêves utopiques et des cauchemars apocalyptiques ont jusqu'à présent dominé le débat éthique sur les nanotechnologies. Des évaluations aussi radicalement divergentes nourrissent le risque de conflits et de réactions fâcheuses. De plus, nombre de ces opinions excessives se fondent encore sur une vision étroite et dépassée d'une nanotechnologie dominée par les auto-assembleurs et les nanomachines. C'est pourquoi, en son état actuel, le débat éthique sur la nanotechnologie exige des évaluations conçues de manière plus équilibrée et reposant sur des informations plus précises.

Afin de concevoir des évaluations éthiques plus critiques de la nanotechnologie et mieux informées des progrès scientifiques actuels, il est judicieux de se centrer sur un domaine particulier de la recherche nanotechnologique. En effet, plusieurs domaines de cette recherche n'ont pas d'objectifs et de dimensions éthiques identiques ou même comparables, par exemple : les matériaux et leur production, la nanoélectronique et les ordinateurs, la médecine, l'aéronautique et l'exploration spatiale, l'environnement et l'énergie, la biotechnologie et l'agriculture,

ainsi que la sécurité. Les évaluations éthiques des progrès réalisés dans ces domaines semblent différentes selon les objectifs et les problèmes éthiques rencontrés pour chacun (Gordijn, 2005). Ce chapitre traite essentiellement des applications de la nanotechnologie en médecine. Il commence par décrire les principaux développements existant dans ce domaine, puis il analyse les problèmes éthiques pouvant émerger des progrès de la nanomédecine.

APPLICATIONS ÉMERGEANTES DE LA NANOTECHNOLOGIE EN MÉDECINE

Bien que le terme de « nanomédecine » évoque un domaine spécifique, la nanomédecine ne peut pas véritablement être considérée comme une sous-discipline de la médecine, comme le sont la génétique clinique, la dermatologie et la cardiologie. La nanomédecine se réfère plutôt à des recherches très diverses en relation avec les nouvelles applications de la nanotechnologie en médecine.

De nombreux scientifiques dans les universités et les entreprises privées travaillent actuellement sur un grand nombre d'applications potentielles de la nanotechnologie en médecine. Cette recherche concerne déjà plusieurs sous-disciplines médicales.

Le rythme auquel s'est développée la nanomédecine a été stupéfiant et les États-Unis sont de très loin en avance dans ce domaine. Par exemple, leurs instituts nationaux de la santé ou NIH (*National Institutes of Health*) se sont organisés pour créer des centres pour le développement de la nanomédecine (*Nanomedicine Development Centers*) dont le personnel est constitué d'équipes scientifiques multidisciplinaires. Ces centres centralisent les ressources intellectuelles et technologiques de la « feuille de route des instituts nationaux de la santé » ou *NIH Roadmap's Nanomedicine Initiative* (NIH, 2006). En mai 2004, les NIH ont tenu leur première conférence publique pour présenter ce programme et discuter de ses orientations. À sa suite, en mars 2005, le premier numéro de la revue *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine* a été publié. Ce périodique est la première revue internationale corroborée par les pairs et exclusivement centrée sur la nanomédecine. Cette revue officielle de l'Académie américaine de nanomédecine (*American Academy of Nanomedicine, AAN*) a entrepris de mettre à disposition les informations les plus récentes sur la recherche et les applications cliniques de la nanomédecine. L'AAN est la première société savante professionnelle consacrée à la promotion de la recherche

dans ce domaine. À la suite de sa création en mars 2005, elle a tenu sa première réunion annuelle à l'université John Hopkins à Baltimore, dans le Maryland, les 15 et 16 août suivants.

Les premières opinions clairement exprimées sur les applications médicales des nanotechnologies se sont caractérisées par de grands espoirs concernant les nanomachines médicales informatisées capables d'accomplir toutes sortes de tâches médicales hautement complexes (Feynman, 1961 ; Drexler, 1986). Malheureusement, la majorité des projets actuels de la recherche nanomédicale se centrent sur une grande diversité de nanostructures plus simples. Par exemple, Freitas a recensé 96 sous-catégories comprenant des projets aussi divers que l'étude de nanomatériaux bruts, de nanomatériaux structurés, du contrôle des surfaces, des nanopores, de la manipulation et du séquençage de l'ADN, les instruments de diagnostic, les machines intracellulaires, les biocapteurs et membranes ou BioMEM, la nanothérapie et la robotique.

Pour donner une idée de l'étendue de la recherche nanomédicale, la partie suivante de ce chapitre présente quatre exemples concrets des études en cours. Il s'agit tout d'abord des moyens d'améliorer les diagnostics, puis des méthodes permettant de transporter directement certains agents thérapeutiques vers une cible spécifique, ensuite des méthodes destinées à améliorer la thérapie du cancer et, enfin, de la production d'implants possédant une meilleure biocompatibilité et une plus grande durée d'usage. Une brève description des grands espoirs exprimés par certains auteurs concernant des nanomachines médicales complexes, contrôlées par ordinateur, conclut cette liste d'exemples.

La nanotechnologie et les méthodes de diagnostic

Un grand nombre de scientifiques conduisent actuellement une recherche sur diverses méthodes nanotechnologiques de diagnostic. Il s'agit, par exemple, de la recherche sur l'utilisation potentielle de particules magnétiques, à nanoéchelle, pour diagnostiquer certaines maladies. Cette recherche vise à utiliser ces particules comme substituts des marqueurs radioactifs ou fluorescents actuellement utilisés pour détecter certaines maladies. À l'instar des méthodes conventionnelles, cette nouvelle approche cherche aussi à utiliser les anticorps monoclonaux qui, spécifiquement produits à des fins diagnostiques, se lient à des antigènes spécifiques. Il est possible de détecter la présence de pathogènes (virus de l'herpès, de l'hépatite B ou du VIH/sida) correspondants à

l'anticorps utilisé, ou encore celle de certaines hormones indiquant une grossesse, un diabète, un infarctus cardiaque et diverses tumeurs. Cette méthode de diagnostic n'utilise pas les substances radioactives ou fluorescentes habituellement employées pour marquer les molécules des anticorps, mais des nanoparticules magnétiques. Les anticorps ainsi marqués sont ensuite introduits dans un échantillon tissulaire alors exposé à un puissant champ magnétique pour les magnétiser. Ce processus devrait permettre d'établir si des anticorps sont entrés en contact avec un antigène, indiquant ainsi la présence d'un pathogène. Les anticorps entrés en contact avec un antigène spécifique génèrent un champ magnétique mesurable indiquant ainsi la présence d'un pathogène. Si, au contraire, les anticorps de l'échantillon de tissu cellulaire ne trouvent rien où s'attacher, ce qui signifie l'absence de pathogènes, les anticorps magnétisés s'agitent en formant des cercles rapides et aucun champ magnétique mesurable n'émane de cet échantillon (Chemla *et al.*, 2000 ; Alivisatos, 2001).

Un autre exemple de la recherche nanomédicale sur les diagnostics concerne la possibilité de travailler à l'avenir sur les « points quantiques » (Alivisatos, 2001 ; Randal, 2001 ; West et Halas, 2000). Les points quantiques sont des cristaux conducteurs à nanoéchelle. Lorsqu'ils sont stimulés par les ondes de lumière émises par un laser, ils émettent différentes couleurs, chacune dépendant de la taille du point quantique. Par exemple, un point quantique de la taille de 2 nm émet une couleur verte, tandis qu'un point quantique de 5 nm émet du rouge (Wolfe, 2002). Lorsqu'elles sont convenablement enrobées, par exemple, d'une fine couche de silicone (West et Halas, 2000), ces nanoparticules peuvent se lier à diverses molécules et être utilisées comme marqueurs. Lorsqu'elles se lient à des anticorps, elles peuvent être utilisées pour détecter des pathogènes.

L'utilisation de « nanoparticules d'or colloïdal » est un autre exemple de la recherche nanomédicale pour les diagnostics (West et Halas, 2000). Cette nouvelle méthode est utilisée pour rechercher l'existence d'une séquence génétique particulière (« séquence-cible ») dans une solution. Elle exploite le fait que les couleurs de l'or colloïdal varient du rouge au bleu-violet lorsqu'il s'aggrège (Alivisatos, 2001 ; Randal, 2001 ; West et Halas, 2000). Cette méthode peut brièvement être décrite de la manière suivante. Deux séries de particules d'or sont utilisées. Dans la première série, plusieurs brins de matériel génétique sont liés à des particules individuelles d'or, les séquences

de ces brins étant complémentaires de la moitié de la séquence cible. Dans l'autre série, ces particules d'or sont aussi liées à plusieurs brins d'ADN, cette fois de manière complémentaire avec l'autre moitié de la séquence cible. Si cette dernière est vraiment présente dans la solution, les deux séries de particules d'or se combinent avec elle. Chacune de ces particules comportant plusieurs brins génétiques possédant une séquence complémentaire de la séquence cible, le circuit qui en résulte maintient fermement ensemble les particules d'or. Une recoloration de la solution auparavant rouge résulte de cette accumulation, apportant ainsi la preuve de l'existence de la séquence cible (Alivisatos, 2001 ; West et Halas, 2000 ; Taton *et al.*, 2000).

Un dernier exemple des applications nanotechnologiques aux diagnostics médicaux implique également les cantilevers. Plusieurs cantilevers sont disposés en forme de peigne et combinés pour produire un détecteur. Ce détecteur permet de vérifier la présence ou non de diverses structures moléculaires dans un seul échantillon. Le principe est le suivant : la surface de chaque « dent » du détecteur en forme de peigne est enrobée de brins de séquences génétiques – différentes sur chaque « dent ». Si l'échantillon contient du matériel génétique complémentaire d'une ou plusieurs séquences génétiques enrobant les cantilevers, alors ce matériel se liera à eux. Cela fait courber de plusieurs nanomètres la « dent » concernée. La courbure dans son ensemble permet de déduire, grâce au détecteur, la présence de certaines molécules dans l'échantillon. L'un des avantages de cette méthode résiderait dans la sensibilité potentiellement élevée du détecteur. Un autre avantage serait la vitesse à laquelle l'existence de plusieurs séquences génétiques pourrait être établie en utilisant un seul échantillon – de manière nanomécanique, sans procédure de marquage (Alivisatos, 2001).

Le transport ciblé de remèdes

Après les diagnostics, le développement de procédures destinées à transporter vers une cible certains agents – insuline, vaccins, hormones de croissance ou matériel génétique – occupe le second type de recherche à laquelle la nanomédecine se consacre. Le ciblage d'agents thérapeutiques promet d'être extrêmement fructueux, car les remèdes visent habituellement un organe, un nombre réduit de cellules ou certaines structures d'un certain type de cellules – comme dans la thérapie génique. Outre le fait d'atteindre leur cible, les types conventionnels de médication, par exemple les comprimés et injections, répandent souvent leurs substances

actives dans d'autres tissus et cellules, ce qui accroît considérablement le risque d'effets secondaires. Un traitement idéal permettrait de mesurer de manière précise les divers paramètres métaboliques fondamentaux des cellules ou des tissus défectueux, puis d'envoyer la quantité précise du remède requis à l'endroit adéquat. Cela ne serait possible que si des systèmes contrôlés au moyen de l'informatique permettant de cibler la médication à nanoéchelle étaient déjà disponibles.

Comparés aux procédures idéales venant d'être esquissées, les systèmes sur lesquels la recherche porte actuellement sont encore élémentaires. À ce jour, la recherche a néanmoins déjà permis d'obtenir les résultats suivants : certaines nanoparticules et certaines nanocapsules peuvent être manipulées afin de développer une préférence pour un milieu spécifique. Cela permet de les transporter plus directement vers les cellules ou les tissus défectueux. Des agents thérapeutiques actifs peuvent être intégrés à des nanoparticules ou à des nanocapsules qui se lient alors aux anticorps ou à d'autres marqueurs moléculaires. Ces nanosystèmes sont capables de localiser des cellules ou des tissus spécifiques.

Les nanoparticules permettant le transport d'agents actifs comprennent les dendrimères – des polymères sphériques synthétiques, creux à l'intérieur et possédant des surfaces arborescentes. Les chercheurs exploitent la structure de ces nanoparticules en fixant des marqueurs moléculaires sur les « branches » de leur surface et en introduisant dans leur centre (creux) les agents actifs destinés à être transportés (Alivisatos, 2001).

La recherche sur la création de capsules de transport « intelligentes » (*smart*) avance. Idéalement, ces capsules seraient capables de transporter des agents actifs vers des endroits spécifiques du corps, puis de les y relâcher. Les « nanocoquilles d'or » sont l'un des exemples de la recherche dans ce domaine. Ce sont des systèmes à nanoéchelle dont le centre est en silicone ou en sulfure d'or et enrobés d'or. Selon leur dimension, elles peuvent absorber différentes longueurs d'onde. La taille d'une nanocoquille d'or, ainsi que le rapport spécifique entre son diamètre et l'épaisseur de la couche d'or à sa surface, détermine la longueur d'onde qu'elle peut absorber (Randal, 2001 ; West et Halas, 2000).

Cette propriété pourrait être exploitée pour le transport ciblé de remèdes de la façon suivante. Un certain type de nanocoquille d'or facilite l'absorption de longueurs d'onde particulières et permet donc

d'estimer une certaine température. Un marqueur moléculaire – par exemple un anticorps ou un enzyme – est d'abord appliqué sur l'or recouvrant la surface de la nanocoquille afin d'assurer que le système de transport ciblé du remède atteigne sa cible. Ensuite, la nanocoquille est connectée à une capsule sensible à la chaleur et contenant l'agent actif qui doit être transporté. Lorsque le nanosystème photothermique est introduit dans un corps, il ne relâche pas son contenu avant que la nanocoquille soit exposée à une certaine longueur d'onde de la lumière, c'est-à-dire tant que de la chaleur n'a pas été générée de manière suffisante pour que la capsule se désintègre (Alivisatos, 2001 ; West et Halas, 2000).

Thérapie du cancer

Depuis un certain temps maintenant, la recherche de nouvelles thérapies du cancer comprend plusieurs méthodes nanomédicales. Leur dénominateur commun est leur exploitation des nanoparticules pour les traitements anticancéreux. La radiothérapie nanométrique, inventée par les chercheurs du Memorial Sloan-Kettering Cancer Center de New York, en est un exemple. Cette technique consiste à insérer certains agents radioactifs – par exemple un seul Actinium de 225 atomes – dans des molécules spécialement produites dans ce but. Ces molécules sont ensuite liées à des anticorps adéquats, leur permettant ainsi de pénétrer dans les cellules cancéreuses (Randal, 2001).

Une autre recherche nanomédicale en thérapie anticancéreuse vise à utiliser certaines nanocoquilles d'or pour détruire une tumeur. Utilisant la lumière, ces nanoparticules – équipées de marqueurs moléculaires les liant aux cellules cancéreuses – peuvent atteindre une température suffisamment élevée pour détruire les cellules cancéreuses auxquelles elles sont liées, et cela sans affecter les tissus sains avoisinants (Alivisatos, 2001).

La biocompatibilité des implants

Lorsqu'un implant est inséré dans un corps, les caractéristiques précises de sa surface jouent un rôle crucial. Il est important, notamment, que cette surface facilite une colonisation cellulaire. La composition moléculaire de la surface d'un implant détermine si les cellules peuvent se développer ou, au contraire, vont mourir. Modifier de manière adéquate la surface des implants permettrait de stimuler la croissance cellulaire. La recherche nanomédicale en étudie actuellement les possibi-

lités (Alivisatos, 2001 ; Taton, 2001). L'une des méthodes consiste à produire des nanotubes de polymère ayant une surface aussi précisément rugueuse que possible. Cela doit permettre la colonisation de cellules endothéliales endogènes qui trouveraient ainsi des points suffisants où s'attacher. Si une telle modification peut réussir à nanoéchelle, les pontages en plastique, par exemple, seraient plus compatibles avec le corps humain. La recherche des caractéristiques des céramiques bioactives utilisées pour les implants d'os constitue une autre méthode de modification des surfaces. La microstructure cristalline de la surface de ces céramiques influence la formation osseuse. La structurer à une échelle nanométrique appropriée stimule la croissance des cellules osseuses qui envahissent alors la surface de la céramique, créant ainsi une attache permanente (Alivisatos, 2001). Un dernier exemple dans ce domaine est la recherche sur le développement de « couches intérimaires » (*interim layers*) biocompatibles. Situées entre la surface de l'implant et les cellules endogènes l'entourant, elles pourraient stimuler la colonisation cellulaire à la surface de l'implant et, ainsi, l'intégration de ce corps étranger. Dans leur ensemble, les techniques de modification nanométrique des surfaces pourraient donc permettre de produire un jour des implants qui, plus biocompatibles, auraient ainsi une plus longue durée de vie.

Les nanomachines médicales

La recherche sur la possibilité de développer des nanomachines informatisées pour exécuter toutes sortes d'interventions médicales est probablement l'exemple le plus futuriste de la recherche nanomédicale présentée ici. Déjà, il existe sur le papier des projets de nanomachines capables d'agir de manière indépendante car équipées de nanomoteurs, ainsi que certains véhicules et détecteurs conçus pour localiser les cibles désirées. Toutefois, leur fabrication n'est pas encore réalisée. Eric Drexler (1986) est convaincu que la production de nanomachines sera possible dans un proche avenir et que leur utilisation fera partie des routines médicales. Les nanomachines biologiques – ribosomes, virus et bactéries – ont toujours existé dans la nature. Les structures très complexes et supra-moléculaires, évoquant celles de nos machines, y pullulent.

Ces nanomachines biologiques sont une importante source d'inspiration pour la conception et la production de nanomachines artificielles. Certaines structures moléculaires naturelle – comme l'ADN

ou les enzymes – sont même envisagées pour servir de composants viables dans la construction de nanomachines artificielles. Toutefois, de nombreux chercheurs estiment qu'il faudra de 20 à 50 ans pour que les premières nanomachines soient suffisamment performantes pour être intégrées aux pratiques cliniques. Par ailleurs, un autre groupe de chercheurs, de taille non négligeable, exprime de sérieux doutes à ce sujet.

Si l'on accepte que la production de nanomachines soit vraiment réalisable, à quoi ressembleraient-elles ? L'aspect de ces futures nanomachines médicales plus ou moins spécialisées dépendrait en grande partie de la région du corps où elles seraient utilisées. Selon Freitas (1998*b*), par exemple, la taille d'une machine conçue pour voyager dans les vaisseaux sanguins humains serait probablement de 500 à 3 000 nm. La taille des nanomachines destinées à circuler non dans le sang, mais dans les tissus humains serait probablement plus grande, allant de 50 à 100 micromètres. Et les nanomachines voyageant dans le système digestif, ou encore dans le système respiratoire, pourraient être encore plus grandes (Freitas, 1998*b*). Freitas a conçu plusieurs machines, décrit et dessiné les plans précis de construction de « respirocytes ». Ces nanomachines, de forme sphérique et constituées d'environ 18 milliards d'atomes, mesurent environ un millième de millimètre de diamètre. Ces sphères fonctionneraient en quelque sorte comme des bouteilles de gaz ; pressurisées et équipées de petites pompes, elles pourraient transporter de l'oxygène à travers le corps. Des détecteurs seraient responsables des échanges gazeux (Freitas, 1998*a*). Les « respirocytes » pourraient remplir dans leur totalité les fonctions des érythrocytes ou globules rouges.

Freitas a également décrit et dessiné les plans d'un autre type de nanomachines, notamment des nanomachines phagocytes qu'il a appelées des « microbivores ». Il pense qu'elles pourraient être utilisées pour combattre un grand nombre de pathogènes présents chez des patients. Un microbivore, introduit et circulant dans le système sanguin d'un patient, pourrait y détecter et détruire tous les pathogènes microbiologiques s'y trouvant (Freitas, 2001). Freitas a également conçu des plaquettes sanguines artificielles qu'il appelle les « clottocytes ». Selon lui, ces « clottocytes » auraient la capacité de coaguler le sang plus efficacement que leurs équivalents naturels (Freitas, 2000).

Comme cela a déjà été mentionné, la production de nanomachines médicales n'est pas encore réalisable. Ce n'est qu'en mettant la

théorie en pratique que l'on saura s'il est possible de fabriquer les multiples nanomachines n'existant encore que sur le papier ou sur Internet (voir, par exemple, Freitas, 2001-2004).

ANALYSE PROSPECTIVE DES QUESTIONS ÉTHIQUES EN NANOMÉDECINE

Les fantasmes concernant de futures applications de la nanotechnologie en médecine n'offrent guère de base solide permettant d'analyser les questions éthiques relatives aux progrès réalisés dans ce domaine. De plus, la recherche actuelle sur ces applications n'a suscité que très peu de réflexion éthique, voire aucune – du moins pas au-delà des canons éthiques habituels concernant leur développement responsable et leur utilisation appropriée dans la recherche préclinique et clinique. Il n'est donc pas surprenant qu'un débat sérieux sur ces questions doive enfin être lancé. Il serait cependant prudent de le lancer dès à présent, même en l'absence de bases solides, dans le sens d'une éthique anticipatrice et prospective. L'analyse suivante des questions éthiques concernant le futur développement de la nanomédecine constitue un premier pas dans cette direction.

Présupposés de cette analyse

Nous allons passer en revue les questions éthiques les plus importantes selon leur capacité à répondre à des problèmes à court, moyen et long termes. Toutefois, avant de procéder à cette analyse anticipatrice, mieux vaut expliquer clairement nos hypothèses fondamentales concernant le futur développement de la nanomédecine. Concernant le court terme, il semble que, pour l'essentiel, les efforts de la recherche en nanomédecine porteront sur le diagnostic, la prévention et les soins des maladies. À moyen terme, lorsque les premiers résultats concrets dans ce domaine auront porté leurs fruits, la nanomédecine se centrera sans doute – lentement mais sûrement – sur les technologies d'amélioration de notre état naturel. À long terme, ces technologies seront très performantes ; nos efforts pour nous modifier nous-mêmes au moyen de la nanomédecine, quels qu'ils soient, pourraient nous conduire à une situation où il ne serait plus du tout approprié de parler d'« êtres humains ».

La description suivante des développements de la nanomédecine existant à ce jour offre une base suffisamment solide pour étayer notre point de vue concernant ce à quoi elle s'intéresse à court terme. La relation entre la nanomédecine et le futur développement des technologies

d'amélioration exige néanmoins quelques explications. Ces technologies, déjà développées dans plusieurs domaines médicaux, comprennent la thérapie génique, l'ingénierie des tissus, la bioélectronique, la psychopharmacologie, la neuroscience, la dentisterie esthétique, la chirurgie esthétique et l'endocrinologie. Leurs développements actuels pourraient aussi bénéficier de nouvelles améliorations grâce aux applications technologiques émergentes. Citons-en quelques exemples.

L'ingénierie des tissus est un domaine interdisciplinaire concerné par la production de substituts biologiques destinés à restaurer, maintenir ou améliorer les fonctions de tissus et d'organes. Il peut s'agir, par exemple, de la production en laboratoire de tissus complexes, tridimensionnels – copiant littéralement la constitution et le fonctionnement des tissus humains. La complexité de ce processus requiert le déploiement de différentes disciplines scientifiques. Les principes et les méthodes des sciences de la vie et de l'ingénierie comprises ensemble (d'où le nom d'« ingénierie des tissus ») y jouent des rôles majeurs. L'on s'attend à ce que la nanotechnologie permette d'accomplir des progrès plus rapides et plus pointus dans ce domaine. Elle pourrait, par exemple, permettre de produire des reconstitutions (*scaffolds*) plus précises. Certaines méthodes d'ingénierie des tissus ont besoin de modèles destinés à guider la croissance de cellules isolées, car elles ne possèdent pas de structure tissulaire en elles-mêmes. Un support histoconductif est donc introduit dans l'agrégat cellulaire artificiellement élargi afin d'y guider la régénération de la structure tissulaire. Le support consiste en un « échafaudage » (*scaffold*) extracellulaire de structure correspondante (bi- ou tridimensionnelle). Les matériaux utilisés pour réaliser ce *scaffold* doivent avoir une porosité très élevée, être biocompatibles et biodégradables, qu'ils soient naturels ou synthétiques. La culture cellulaire est introduite par une pipette dans le *scaffold* afin de créer et maintenir suffisamment d'espace pour que les cellules s'y forment. Sa structure contrôle à la fois leur développement et y permet la diffusion des nutriments. La nanotechnologie pourrait permettre de produire des *scaffolds* de meilleure qualité, stimulant ainsi les progrès de l'ingénierie des tissus. Si cela aboutit, l'ingénierie des tissus pourrait permettre de restaurer de mieux en mieux les fonctions des cellules, des tissus et des organes. Enfin, l'ingénierie des tissus peut être aussi utilisée pour améliorer ces mêmes fonctions.

La recherche bioélectronique porte sur les systèmes intégrant un mélange de composants électroniques et biologiques. Dans leurs

applications médicales, les appareillages électroniques sont souvent, en partie ou en totalité, « construits à l'intérieur » des êtres humains. Les découvertes de cette recherche ont déjà permis des applications cliniques, par exemple des implants de cochlée dans l'oreille. Les systèmes bioélectroniques intègrent les progrès réalisés en technologie prothétique et ceux de la science informatique. Il n'est donc pas surprenant que ce domaine ait bénéficié des progrès de la miniaturisation réalisés en particulier en information et télécommunication. C'est pourquoi l'on s'attend à ce que la nanotechnologie stimule de nouveaux développements en bioélectronique. Concernant l'optimisation du cerveau humain, la capacité mémorielle pourrait être améliorée au-delà de ses limites actuelles, ainsi que la capacité humaine de traiter les informations. Freitas a écrit à ce sujet : « Un appareil nanostructuré destiné à stocker des données mesurant environ 8 000 micron³, volume correspondant environ à la taille d'une seule cellule de foie humain et plus petit qu'un neurone commun, pourrait stocker une somme de données équivalente à la totalité de celles contenues dans la bibliothèque du Congrès américain. Implanté dans le cerveau humain et possédant des interfaces appropriées, cet appareil permettrait d'accéder très rapidement à ces données. » (Freitas, 1998b) Les applications de divers systèmes bioélectroniques destinés à améliorer l'espèce humaine résulteraient ainsi en une connexion toujours plus symbiotique entre, d'une part, le système humain biologique et, d'autre part, les divers systèmes techniques qui y seraient implantés. Ce phénomène est désigné sous le terme de « cybergisation » du corps humain.

La chirurgie esthétique concerne les interventions chirurgicales destinées à embellir l'apparence physique ; ses applications cliniques sont déjà très étendues. Bien que les méthodes invasives visant à embellir notre apparence physique soient assez anciennes, la chirurgie esthétique moderne n'a vraiment commencé de se développer qu'au xx^e siècle. La Première et la Seconde guerres mondiales ont entraîné son développement dont deux branches différentes ont émergé : la chirurgie plastique reconstructive et la chirurgie esthétique. La première traite les patients souffrant de tumeurs, brûlures, mutilations, malformations héréditaires, etc. Cette sorte de chirurgie plastique a pour objectif essentiel le célèbre *restitutio ad integrum*, c'est-à-dire rendre à l'être humain son intégrité. Par ailleurs, la chirurgie esthétique traite des personnes en bonne santé qui, pour une raison quelconque, ne sont pas satisfaites de leur apparence. Les prochains développements de la nanotechnologie pourraient

conduire à une grande diversité d'applications nanotechnologiques qui offriraient à la chirurgie esthétique de meilleurs moyens d'améliorer et embellir notre aspect physique.

Les progrès des nanotechnologies pourraient permettre à tous ces domaines médicaux, ainsi qu'à plusieurs de ses sous-domaines, d'obtenir, de manière extrêmement rapide et donc spectaculaire, de nombreuses améliorations, y compris celles de nos capacités sensorielles, motrices et cognitives, du contrôle de nos humeurs et de notre aspect physique. À long terme, cela pourrait conduire la nanotechnologie médicale à pouvoir transformer les êtres humains au point où il ne serait plus même possible de considérer les créatures ainsi transformées comme de véritables êtres humains.

Problèmes éthiques à court terme

Les risques de la nanomédecine

L'opinion publique concernant les risques de la nanotechnologie a été marquée par des cauchemars apocalyptiques inspirés de la vision qu'Eric Drexler avait tout d'abord donnée d'une nanotechnologie où les assembleurs moléculaires autorépliquants jouent un rôle central. Bien que cette première conception de la nanotechnologie semble maintenant démodée, notamment aux yeux de Drexler lui-même (Phoenix et Drexler, 2004), elle a exercé une importante influence sur l'opinion publique. À ce sujet, l'influence de Bill Joy, cofondateur et directeur scientifique de l'entreprise privée Sun Microsystems, a été encore bien plus importante. Dans son célèbre article publié par le journal électronique *Wired*, intitulé "*Why the future doesn't need us*" (« Pourquoi l'avenir n'a pas besoin de nous »), il a mis en garde contre divers risques que la nanotechnologie pourrait entraîner à l'avenir (Joy, 2000). Il lui semble particulièrement inquiétant que la recherche porte sur les moyens de produire des assembleurs. Ces assembleurs auraient la capacité de se reproduire rapidement de manière accidentelle et donc dangereuse, car ils deviendraient ainsi incontrôlables. Avec le temps, des nanomachines capables de s'autoreproduire pourraient s'échapper, se reproduire et violer la biosphère – ce qui conduirait à une catastrophe générale (le scénario d'une fin du monde connu sous le nom de *grey goo*, c'est-à-dire « gelée ou glu grise »). Michael Crichton a décrit cette catastrophe dans son roman *La Proie* (*Prey*), paru en 2002, immortalisant ainsi, dans l'arène publique, la vision d'un roman de science-fiction dystopique.

La manière dont Drexler a tout d'abord attribué une place centrale aux assembleurs moléculaires autorépliquants a néanmoins fait l'objet de sévères critiques, comme nous l'avons déjà mentionné. En premier lieu, les critiques ont nié qu'il soit même matériellement possible de créer des assembleurs moléculaires (Ashley, 2001 ; Smalley, 2001). Ensuite, les critiques ont déclaré que, même si cela devenait possible, il serait plus facile et plus efficace de développer une production moléculaire sans ces systèmes (Phoenix et Drexler, 2004). Au vu de ces critiques, les risques que des assembleurs autorépliquants deviennent fous peuvent être considérés comme un thème de science-fiction.

Les véritables risques de la nanotechnologie, en général, et de la nanomédecine, en particulier, apparaîtront probablement dans des domaines encore non identifiés. Actuellement, la recherche des risques en nanotechnologie médicale se centre sur les effets sanitaires des nanoparticules – sans avoir produit de résultats définitifs. Il est clair que cette recherche est extrêmement importante, mais elle s'avère également très compliquée. En effet, il est impossible d'étendre simplement ce que nous savons des nanoparticules au nanodomaine. Tout d'abord, les lois de la physique classique ne peuvent pas vraiment s'appliquer aux objets à nanoéchelle. Des phénomènes inattendus peuvent donc se produire. Ensuite, les nanoparticules sont beaucoup plus petites que les microparticules. Elles peuvent donc accéder à presque n'importe quelle partie cachée du corps. Si cette propriété rend les nanoparticules particulièrement intéressantes pour transporter des remèdes de façon ciblée, cela peut entraîner de nouveaux risques sanitaires. Enfin, la réactivité des nanoparticules est renforcée par leur surface relativement plus grande. En conclusion, les effets sanitaires spécifiques des nanoparticules ne dépendent pas seulement de leurs substances, mais aussi de leur taille, de la chimie de leur surface, de leur cristallinité, leur forme, leur charge, leur solubilité, leur porosité, leur durabilité, etc.

Pour réduire les risques impliqués par l'utilisation d'une catégorie particulière de particules, une recherche plus avancée sur les risques spécifiques inhérents à leur profil sera nécessaire, c'est-à-dire portant sur leur nature, leur magnitude et leur probabilité. Ce type de recherche peut aboutir à une évaluation adéquate qui servirait alors de base à des stratégies visant à réduire de tels risques. Cela peut impliquer, par exemple, de changer une nanoparticule dangereuse par une autre qui le soit moins, ou encore de réduire l'exposition à une particule dangereuse.

Lorsque l'on en vient à l'évaluation éthique des risques impliqués par la nanotechnologie appliquée à la médecine, des critères bien établis existent heureusement déjà. Par exemple, il est largement accepté que les risques doivent être éliminés autant que possible dans la recherche préclinique à l'aide d'expérimentations animales et autres. De plus, les normes fondamentales auxquelles les applications nanomédicales doivent se conformer sont le consentement éclairé et un équilibre entre les risques et les bénéfices.

Le diagnostic sans traitement

Depuis longtemps, diagnostic et thérapie font partie des moyens médicaux. Idéalement, le premier sert la seconde qui, à son tour, sert à améliorer l'état de santé d'un patient ou, lorsque c'est possible, à alléger ses souffrances. Posé correctement, le diagnostic contribue donc aussi, indirectement, non seulement à la thérapie, mais encore à l'état de bien-être. Comme la thérapie, il possède une valeur intrinsèque. C'est pourquoi ces deux moyens sous-tendant la nanomédecine sont particulièrement intéressants.

Un danger ne peut cependant être ignoré. De même que la génétique, l'on pourrait penser que le domaine de la nanomédecine accentue également l'écart existant entre les capacités diagnostiques et thérapeutiques – comme dans le cas de la maladie de Huntington ou celle d'Alzheimer. De plus, il semble qu'à l'avenir, au fur et à mesure que la génétique se développera, il sera de plus en plus possible d'établir des diagnostics pronostiquant des maladies pour lesquelles aucun traitement n'est encore disponible. Les chances deviendront ainsi plus importantes pour qu'un patient soit informé d'une structure génétique défavorable comprenant une disposition à développer une maladie particulière, mais qu'il ne puisse alors pas recevoir de traitement si cette maladie se manifeste. Le savoir serait alors inférieur aux avantages.

La recherche dans le domaine de la nanomédecine pourrait également se développer dans une direction aussi insatisfaisante. Il faudrait alors déployer les plus grands efforts possibles pour éviter que cela ne se produise et donc ne faire appel aux moyens de poser un diagnostic, par exemple, que s'ils présentent clairement un avantage pour les patients. Une discussion détaillée va suivre afin de déterminer les critères permettant d'identifier clairement cet avantage. Lorsque cela s'avère possible, le développement de nouveaux moyens diagnostiques devrait cibler les maladies qui peuvent être prévenues et soignées.

Le diagnostic exact d'une maladie incurable étant toutefois souvent le premier pas pour découvrir comment la traiter, cette recommandation peut s'avérer quelque peu problématique.

Problèmes éthiques à moyen terme

Confusions concernant la manière de concevoir le corps

Pendant longtemps, la manière dont la médecine concevait le corps n'était pas problématique : « le corps » était tout ce qui se trouvait à l'intérieur de la peau enveloppant un organisme. La peau posait clairement une limite entre le corps et son environnement, et tout ce qui se trouvait à l'extérieur de cette limite n'appartenait, de toute évidence, pas au corps. Divers progrès médicaux ont récemment rendu ce concept beaucoup plus compliqué. La nouvelle discipline qu'est la transplantation des organes, par exemple, a facilité l'implantation de « sous-parties » du corps qui, auparavant, étaient localisées en-dehors de celui-ci. Il en est de même des prothèses. Établir si un organe implanté ou une prothèse font partie du corps dans lequel l'un ou l'autre sont introduits, ou bien s'ils leur restent étrangers, n'est maintenant pas clair. Ce n'est pas plus évident dans le cas d'un appareillage connecté à l'extérieur du corps afin de lui assurer des fonctions physiques essentielles, par exemple un appareil de dialyse ou un poumon artificiel. Il devient alors plus difficile de dire précisément ce qui constitue le « corps ».

L'on s'attend à ce que les progrès de l'ingénierie tissulaire compliquent encore plus le concept que nous avons du corps. À quelle catégorie un organe appartiendrait-il lorsqu'il se constitue à partir d'un échantillon de cellules provenant du corps même du receveur (de telle sorte qu'il pourrait être appelé « endogène »), mais qu'il a été développé hors de ce corps, puis implanté (de telle sorte qu'il pourrait tout aussi bien être appelé « exogène ») ? Cela s'avérerait encore plus difficile si l'apparence et les fonctions des tissus ou des organes développés en laboratoire ne pouvaient plus, avec le temps, être distinguées de leurs équivalents endogènes – comme il est tout à fait possible que cela se produise. La différence entre des corps « naturels » (sans intervention comparable à celles évoquées plus haut) et des corps « manipulés » (contenant des sous-parties artificielles) devient de plus en plus floue. Jusqu'à un certain point, cette distinction peut même ne plus exister.

Les progrès de la chirurgie esthétique pourraient ajouter à la confusion. L'image subjective du corps est le pivot de la chirurgie esthétique. Bien que jouissant d'une bonne santé, le fait de ne pas être

satisfait d'une certaine partie de son apparence physique, *a fortiori* si elle est véritablement disgracieuse, affecte sérieusement la qualité de la vie. La relation entre l'image subjective du corps et la forme objectivement visible de ce dernier n'est cependant pas toujours évidente. La perception subjective est influencée par toutes sortes d'expériences, par l'estime de soi, par des attentes du milieu social et d'autres facteurs socioculturels. Une chirurgie esthétique extrêmement avancée pourrait finalement transformer le corps en un objet très semblable à un vêtement à la mode ou non.

De plus, les systèmes bioélectroniques destinés à améliorer les capacités sensorielles et motrices deviendront probablement de plus en plus répandus. Par exemple, l'on se demande maintenant comment connecter un œil naturel à un œil artificiel. Idéalement, l'œil artificiel aurait une capacité de vision meilleure et plus étendue que l'œil naturel. Des humains équipés d'un tel œil pourraient voir des longueurs d'onde qui leur étaient auparavant invisibles (par exemple les infrarouges), ou encore des objets trop éloignés ou trop petits pour être perçus par l'œil naturel. En ce qui concerne les capacités motrices des humains, la recherche s'intéresse actuellement aux capacités musculaires permettant, notamment, de courir à une vitesse « surnaturelle ». De tels systèmes pourraient permettre à des soldats de mieux se défendre et de s'enfuir plus vite. L'utilisation généralisée de ces systèmes bioélectroniques destinés à améliorer des fonctions corporelles essentielles contribuerait certainement à ne plus vraiment savoir quelles parties ou fonctions appartiennent à notre corps. Il deviendra ainsi de plus en plus difficile de distinguer les fonctions naturelles de celles qui sont artificielles.

Nouvelles attitudes à l'égard du corps

Depuis un certain temps, de nouvelles possibilités – telles que la médecine de transplantation ou la chirurgie esthétique – ont généré de nouvelles attitudes à l'égard du corps. Tout d'abord, ces nouvelles possibilités donnent de plus en plus l'impression que le corps est entièrement composé de nombreux éléments différents. Le développement, les fonctions et les caractéristiques physiques semblent de moins en moins dépendre de la nature et, au contraire, de plus en plus contrôlables et modifiables. Selon une opinion qui devient dominante, il serait possible d'assurer le bon fonctionnement du corps en changeant régulièrement les parties défectueuses. Cette nouvelle attitude entraîne

le fait que le corps est de plus en plus conçu comme un produit de la technologie, à l'instar d'une machine.

Ensuite, un processus de commercialisation et de marchandisation du corps commence à apparaître. Le corps et toutes ses sous-parties deviennent de plus en plus des biens commercialisables. Il en est ainsi des cellules, tissus, organes et cela va même jusqu'à l'« emprunt » d'utérus. Non seulement les ovules et le sperme, mais encore les cheveux, le sang, les cordons ombilicaux, les placentas et le prépuce sont en train de faire de plus en plus partie du nouveau marché concernant le corps. Des scientifiques et des entreprises brevètent des gènes. Les embryons et les cadavres humains sont maintenant considérés comme autant de sources disponibles pour remplacer des organes et des tissus. Le corps est traité comme une machine inanimée dont les différentes parties peuvent être utilisées. Ce processus semble dépouiller l'être humain du respect et même du caractère sacré qui lui étaient accordés.

Les progrès que la nanotechnologie a rendus possible en médecine pourraient accélérer ce changement d'attitude envers le corps. De manière plus spécifique, la commercialisation et la désacralisation du corps humain et de ses parties pourraient s'intensifier avec les développements suivants de la nanomédecine :

Le corps deviendra de plus en plus un produit de la technologie. Par exemple, des magasins entiers pourraient proposer des cellules, tissus et organes de remplacement produits par la nanotechnologie que l'on pourrait acheter quand cela semble nécessaire.

Le corps fera progressivement partie des systèmes technologiques. Par exemple, le corps et ses fonctions pourraient subir des check-up réguliers et être surveillés de manière constante grâce à des nanodétecteurs et nanopuces qui enregistreraient tout ce qui menacerait la santé. Ces gadgets seraient reliés à des systèmes informatisés qui répondraient automatiquement à une grande diversité de désordres et maux communs (en activant par exemple certains nanosystèmes destinés à fournir des remèdes). Au lieu de nous sentir responsables de notre propre santé, nous pourrions de plus en plus en confier la responsabilité à la technologie.

La technologie copiera de mieux en mieux le corps et deviendra sans cesse plus importante. Grâce à sa tendance à miniaturiser divers domaines techniques, elle pourra copier des structures et des mécanismes du corps tels que l'ADN, les mitochondries ou les ribosomes de nos cellules, ou encore les circuits neuronaux de notre cerveau.

Vie privée et autonomie

Cette « cybergisation » du corps par la nanotechnologie pourrait résulter en une violation de l'autonomie ou de la vie privée. L'usage généralisé d'interventions bioélectroniques destinées à améliorer les capacités cognitives des êtres humains intensifierait leur dépendance à l'informatique. Par exemple, le contact avec différentes banques de données ne se ferait plus par l'intermédiaire des doigts sur le clavier d'un ordinateur, mais directement par le cerveau connecté de manière permanente avec une sélection de banques de données grâce à un système bioélectronique qui lui serait intégré. L'usage généralisé d'interventions bioélectroniques « améliorantes » sur les êtres humains intensifierait aussi la communication avec d'autres êtres humains. La communication avec des personnes géographiquement éloignées se ferait non seulement grâce au téléphone et à la télévision, mais encore deviendrait possible de manière permanente grâce à des liens de cerveau à cerveau, par exemple en utilisant un système de communication de « cyberpensée ».

Ces applications permettant d'accéder plus facilement à la vie privée d'autres êtres humains pourraient avoir plusieurs effets secondaires. Les fragments digitaux dont un ordinateur laisse des traces avec le temps pourraient permettre de retracer et d'enregistrer les mouvements et les activités exacts d'une personne. De plus, le circuit précis suivant lequel un cerveau humain fonctionne rendrait possible d'enregistrer ses impressions visuelles et ses pensées, etc. À tout moment, un individu sélectionné pourrait ainsi être localisé et tous les aspects de sa vie, y compris « intérieure », enregistrés. Accéder facilement à tout ce qui constitue la vie, même la plus intime, d'une personne rendrait possible (plus ou moins) d'exercer sur elle une influence subtile et de la contrôler. La mise en réseau de cerveaux signifierait que les êtres humains pourraient recevoir de l'information subliminale – et être ainsi influencés subconsciemment. C'est pourquoi cela violerait non seulement la vie privée d'une personne, mais encore son autonomie.

L'identité personnelle

Lorsqu'une personne s'interroge sur elle-même, elle se pose en général les questions suivantes : À quoi suis-je bon/ne ? Quelles sont mes qualités ? Suis-je à la hauteur de mes responsabilités ? Quel est mon vrai caractère ? En quoi suis-je unique ? Quels sont mes souvenirs ? Quelle est l'histoire de ma vie ? Si un être humain était constamment soumis aux nouvelles interventions bioélectroniques visant à améliorer

ses capacités sensorielles, motrices et/ou cognitives, il lui deviendrait sans cesse plus difficile de répondre à ces questions. Améliorer les capacités cognitives d'un être humain pourrait, par exemple, le conduire à ne plus faire d'effort intellectuel et donc à devenir totalement dépendant d'implants bioélectroniques de performance élevée. En conséquence, cet être humain éprouverait des difficultés sans cesse croissantes à dire que ses pensées et ses actions résultent toujours de ce qu'il a *personnellement* accompli. S'il devenait possible de produire des implants visant à améliorer non seulement les capacités cognitives, mais encore les émotions, il deviendrait de plus en plus difficile de déterminer les caractéristiques spécifiques d'un individu. Enfin, si un grand nombre de personnes étaient connectées de manière permanente à des banques de données, le caractère particulier de certaines informations privées deviendrait relatif et cela pourrait alors réduire le caractère unique de chaque personne ainsi connectée.

L'implantation de systèmes bioélectroniques de communication par « cyberpensée » – qui relieraient plusieurs individus afin de les rendre capables d'échanger leurs pensées conscientes et leurs expériences – pourrait effacer la ligne séparant le Moi de cette cybercommunauté de pensée. Une fois qu'un individu serait équipé de ce type de connexion mentale, comment ses propres pensées, ses expériences et son destin pourraient-ils se distinguer de ceux des autres ? De plus, la frontière séparant le monde réel du virtuel s'estomperait progressivement, ce qui rendrait aussi de plus en plus difficile de déterminer sa propre identité.

La médicalisation

D'autres inventions pourraient se généraliser afin d'améliorer les capacités sensorielles, motrices et cognitives, ainsi que notre apparence physique, et s'accompagner ainsi du problème de la médicalisation. Il est parfaitement probable qu'un certain nombre de personnes ayant suivi des interventions d'« amélioration », d'autres aient de plus en plus envie de s'y soumettre. Autrement, elles craindraient de ne plus être au niveau de leur entourage. Avec le temps, il se pourrait que l'attitude prédominante, pour réussir sa vie, entraînerait chacun à devoir soumettre son corps à toutes sortes d'interventions « améliorant » ses capacités. Cela pourrait finir par causer une attitude négative envers les capacités humaines normales. Les capacités moyennes finiraient presque par être assimilées à des défauts exigeant d'être modifiés, voire

éliminés. Les gens pourraient avoir peur que leur corps et leurs capacités deviennent totalement inadaptés. Cela pourrait avoir pour résultat de transformer les interventions d'« amélioration » en une médicalisation visant à obtenir ce qui serait alors considéré comme des capacités humaines fonctionnant de manière normale et une apparence physique normale.

L'injustice sociale

D'autres développements et applications des divers moyens nanomédicaux d'« amélioration » pourraient, avec le temps, entraîner des injustices sociales. Il est clair que la société moderne est très influencée par la performance et l'esprit de compétition. La compétition est devenue si commune dans la société qu'il est facile d'imaginer que des individus s'intéresseraient aux interventions nanomédicales qui pourraient améliorer leurs capacités cognitives et leur offrir ainsi certains avantages jouant un rôle décisif dans cette compétition pour maintenir et développer une carrière professionnelle, amasser des biens matériels et gagner en prestige social. Il est aussi imaginable que des parents veuillent équiper leurs enfants de systèmes nanomédicaux améliorant leurs capacités cognitives qui, continuellement mis à jour, leur permettraient de gagner la compétition et de réussir de façon durable.

De manière générale, l'injustice sociale résulte de différences sociales injustes. Les différences sociales ne sont cependant pas injustes en elles-mêmes. Par exemple, l'on considère souvent qu'une personne travaillant plus dur et obtenant de meilleurs résultats gagne aussi plus et puisse ainsi bénéficier de conditions de vie plus agréables. Les différences sociales injustes ne proviennent que d'une distribution éthiquement injustifiable des biens sociaux, notamment le statut, le prestige, l'argent ou l'emploi.

De nouveaux systèmes d'« amélioration » nanomédicale pourraient-ils entraîner une distribution injuste de ce type de biens ? Deux scénarios peuvent être envisagés pour répondre à cette question. Dans le premier scénario, les interventions d'« amélioration » nanomédicale seraient réservées à ceux qui pourraient en assumer eux-mêmes les frais. Dans le second, chacun sans exception pourrait accéder à ces interventions.

Dans le premier scénario, seuls les riches profiteraient des effets de ces interventions, c'est-à-dire ceux qui bénéficieraient déjà d'un statut social élevé et de biens matériels importants. En ce cas, ces interven-

tions rendraient la distribution inégale des biens sociaux encore plus déséquilibrée. Les privilégiés continueraient de renforcer leurs positions sociales et professionnelles déjà exceptionnelles. D'autres opportunités pour améliorer leur statut social et professionnel deviendraient particulièrement disponibles pour ceux se trouvant déjà au sommet de la hiérarchie sociale. Ce serait injuste car, tout d'abord, cela exacerberait encore plus la distribution déjà inégale des biens entre riches et pauvres et, ensuite, cela entraverait dans une société donnée les principes d'égalité des chances et de solidarité avec les personnes vulnérables.

Dans le second scénario, ces interventions étant mises à disposition de la population dans son ensemble, les inégalités existant déjà dans la distribution des biens sociaux ne seraient pas exacerbées. Toute personne qui le souhaiterait pourrait subir une intervention de ce type et ainsi en profiter. Ce scénario n'entraînerait pas d'injustice sociale.

Si l'on pense néanmoins au manque d'argent sévissant actuellement dans le secteur sanitaire, le premier scénario – où ces interventions sont réservées aux riches – semble le plus probable. Personne ne voudrait prendre en charge l'énorme coût représenté par de telles interventions à l'échelle d'une population entière.

Une autre conception de l'être humain

Les progrès de la nanomédecine pourraient stimuler une vision de l'être humain qui le réduirait à une machine moléculaire complexe. Cela signifierait que toutes les maladies et défauts physiques et mentaux, aussi bien que toutes les capacités humaines désirables, feraient partie d'une conception faisant de l'être humain une machine moléculaire. Si ce type de conception exclusivement technique des maladies, des handicaps ou de l'autoperfectibilité devenait prédominant, toute autre approche valable – disons, psychologique ou spirituelle – de ces phénomènes serait finalement éliminée.

Les écrits d'Eric Drexler contiennent des idées inspirées par le réductionnisme et l'optimisme technique. Drexler est l'un des premiers à avoir reconnu et décrit les innombrables applications potentielles de la nanotechnologie dans le domaine médical (Drexler, 1986). Selon lui, le concept fondamental qui se cache derrière la nanomédecine est extraordinairement simple : les maladies, le vieillissement et autres faiblesses humaines non pathologiques peuvent tous être considérés comme des configurations atomiques et moléculaires défavorables causées par différents facteurs – par exemple des bactéries, des virus,

des mutations génétiques ou des accidents. La médecine d'aujourd'hui s'efforce, elle aussi, d'éliminer des configurations défavorables, mais les moyens dont elle dispose à ce jour, y compris les scalpels et les médicaments, sont en comparaison encore très primitifs. Si des nanomachines étaient disponibles, elles pourraient être utilisées pour éliminer ces configurations défavorables jusque dans leurs moindres détails et même les reconfigurer comme désiré, à niveau moléculaire. La possibilité d'intervenir directement à un tel niveau élargirait considérablement les moyens des traitements médicaux. Toutes sortes de configurations fonctionnant au-dessous de leur seuil optimal pourraient alors être optimisées (Drexler, 1986).

Si la nanomédecine atteignait ces objectifs, le domaine médical pourrait courir le danger de développer une approche autoritaire des êtres humains et donc des patients, ce qui reposerait seulement sur une conception réductrice et techniquement optimiste. La conception de l'être humain en tant que machine moléculaire pourrait dominer, au fur et à mesure que la nanomédecine progresse, non seulement le royaume médical, mais encore la sphère du grand public. Dans sa recherche de réponses aux problèmes posés par, disons, la criminalité ou la pauvreté, la société pourrait être tentée de réduire ses perspectives à des réponses purement techniques. Un tel développement serait regrettable, à tout le moins parce qu'il pourrait conduire à facilement supprimer d'autres approches, qu'elles soient politiques, sociologiques, spirituelles ou psychologiques.

Néanmoins, si la réductionnisme et l'optimisme technique devaient à l'avenir prédominer dans le domaine médical, l'espoir resterait au moins que leur inadéquation soit mise en lumière. L'extrême réductionnisme, par exemple, révélerait bientôt que les maladies ne peuvent pas être considérées ni être traitées exclusivement comme des conséquences de modifications atomiques ou moléculaires défavorables. Certaines maladies telles que la dépression ou l'anorexie nerveuse ne seront probablement jamais réductibles au niveau moléculaire.

Problèmes éthiques à long terme

Effacement de la perception de soi

Si les progrès de la nanotechnologie devaient rencontrer le succès que ses nombreux avocats lui souhaitent, la symbiose entre l'homme et la technologie deviendrait de plus en plus étroite. La « cybergisation » de l'espèce humaine prendrait rapidement place. Ce processus – consistant

à faire de plus en plus des êtres humains un produit technologique – peut être nommé une « chosification technique » des êtres humains.

Un second processus s'est manifesté récemment : les systèmes technologiques ne cessent d'être développés sur le modèle des systèmes organiques et cela, pour n'en citer que quelques exemples, dans les domaines de l'intelligence artificielle, de la robotique et des circuits neuronaux. À long terme, l'on espère que des systèmes technologiques pourront imiter certaines compétences humaines et animales. Comparé à la « chosification technique » des êtres humains, ce processus pourrait être appelé une « anthropomorphisation » de la technologie.

À long terme, la combinaison de ces deux processus pourrait entraîner le problème suivant : les oppositions couplées existant depuis des centaines d'années, y compris entre « nature » et « culture », entre matériau « biologique » et « non biologique », deviendraient complètement floues. De plus, ces couplages ont pendant longtemps représenté des éléments essentiels de la perception que les humains ont d'eux-mêmes. Un tel flou générerait une transformation fondamentale de leur perception pour faire face à cette nouvelle situation. Si la « chosification technique » des êtres humains et l'anthropomorphisation de la technologie devaient devenir une réalité, que resterait-il d'intrinsèquement « naturel » chez les êtres humains et de leur « humanité » ? Que restera-t-il d'inviolable chez les êtres humains si nous ne voulons pas courir le risque que ce qui est « typiquement humain » disparaisse ? Où situer la différence entre des êtres humains et des artefacts ? Dans de telles conditions, les fondations de notre conception de l'humanité s'en trouveraient fortement ébranlées.

La post-humanité

À long terme, la nanomédecine pourrait entraîner une transformation radicale de l'espèce humaine. Les efforts de l'humanité pour se modifier, comme et quand elle le voudrait, pourraient aboutir à une situation où il ne serait plus du tout possible de parler d'« êtres humains ». De récents romans médicaux décrivent comment cela pourrait prendre place : grâce à la médecine, l'homme pourrait s'éloigner de ce qui caractérise son existence humaine, avec toutes ses faiblesses et ses imperfections innées.

Cela pourrait consister, par exemple, à dépasser ce qui caractérise naturellement l'être humain en le fusionnant avec une machine, ou encore à le transformer à l'aide de modifications génétiques de la ligne

génomique, répétées sur des générations successives. Le scénario de la technique dite d'*uploading* nous offre un autre exemple ; elle consisterait à transférer les données se trouvant dans un cerveau humain vers un ordinateur. En utilisant des nanomachines spécialisées, le cerveau pourrait être scanné, atome par atome, grâce à une résolution suffisante. Les circuits neuronaux du cerveau pourraient alors être connectés sur un support électronique et donner ainsi le jour à une intelligence informatisée qui pourrait continuer d'exister pendant des siècles.

Bien que ces scénarios relèvent à présent de spéculations extrêmes, il reste difficile de réfuter de manière définitive l'idée que la nanomédecine puisse un jour progresser encore à l'aide de technologies d'« amélioration » aussi sophistiquées que radicales et modifier l'espèce humaine de manière telle qu'il ne soit plus possible de parler de l'être humain comme nous le faisons maintenant couramment. C'est pourquoi une réflexion prospective sur les implications d'un tel développement est devenue souhaitable. Cela exige de répondre aux deux questions suivantes. Tout d'abord, quelles altérations modifieraient-elles les êtres humains de façon si radicale qu'il ne serait plus possible de les considérer comme des êtres post-humains, voire des humains ? Ensuite, serait-il éthiquement désirable que l'espèce humaine connaisse une existence post-humaine ?

BIBLIOGRAPHIE

- Alivisatos, A. P. 2001. "Less is more in medicine". In : *Scientific American*, Vol. 285, No. 3, 59-65.
- Ashley, S. 2001. "Nanobot Construction Crews". In : *Scientific American*, Vol. 285, No. 3, 76-77.
- Chemla, Y. R. ; Grossman, H. L. ; Poon, Y. ; McDermott, R. ; Stevens, R. ; Alper, M. D. ; Clarke, J. 2000. "Ultrasensitive magnetic biosensor for homogeneous immunoassay". In : *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 97, No. 26, 14268-14272.
- Drexler, K. E. 1986. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. New York : Anchor Press/Doubleday.
- Feynman, R. 1961. "There's plenty of room at the bottom". In : Gilbert, H. D. (Ed.), *Miniaturization*, 282-296. New York : Reinhold.
- Freitas, R. A. 1998a. "Exploratory design in medical nanotechnology: A mechanical artificial red cell". In : *Artificial*

- Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology*, Vol. 26, No. 4, 411-430.
- . 1998b. *Nanomedicine FAQ*.
<http://www.foresight.org/Nanomedicine/index.html#NMFAQ>.
 (accès 1er novembre 2005)
- . 1999. *Nanomedicine I: Basic Capabilities*. Georgetown, TX : Landes Bioscience.
- . 2000. “Clottocytes: Artificial mechanical platelets”. In : *Foresight Update*, Vol. 41. <http://www.imm.org/Reports/Rep018.html> (accès 1er novembre 2005)
- . 2001. *Microbivores: Artificial mechanical phagocytes using digest and discharge protocol*. <http://www.zyvex.com/Publications/articles/Microbivores.html> (accès 1er novembre 2005)
- . 2001-2004. *Nanomedicine Art Gallery*. Palo Alto, CA : Foresight Nanotech Institute. <http://www.foresight.org/Nanomedicine/Gallery/index.html> (accès 20 décembre 2006)
- . 2005. “What is nanomedicine?”. In : *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, Vol. 1, 2-9.
- Gordijn, B. 2005. “Nanoethics: From apocalyptic nightmares and utopian dreams towards a more balanced view”. In : *Science and Engineering Ethics*, Vol. 11, No. 4, 521-533.
- Joy, B. 2000. “Why the future doesn’t need us”. In : *Wired*, Vol. 8, No. 4 <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html> (accès 1er novembre 2005)
- NIH. 2006. *NIH Roadmap for Medical Research: Nanomedicine*. Bethesda, MD : Office of Portfolio Analysis and Strategic Initiatives (OPASI), NIH. <http://nihroadmap.nih.gov/nanomedicine/index.asp> (accès 22 décembre 2006)
- Phoenix, C. ; Drexler, E. 2004. “Safe exponential manufacturing”. In : *Nanotechnology*, Vol. 15, 869-872.
- Randal, J. 2001. “Nanotechnology getting off the ground in cancer research”. In : *Journal of the National Cancer Institute*, Vol. 93, No. 24, 1836-1838.
- Smalley, R. E. 2001. “Of chemistry, love and nanobots”. In : *Scientific American*, Vol. 285, No. 3, 68-69.
- Taton, T. A. 2001. “Nanotechnology: Boning up on biology”. In : *Nature*, Vol. 412, 2 August, 491-492.

- Taton, T. A. ; Mirkin, C. A. ; Letsinger, R. L. 2000. "Scanometric DNA array detection with nanoparticle probes". In : *Science*, Vol. 289, 1757-1760.
- West, J. L. ; Halas, N. J. 2000. "Applications of nanotechnology to biotechnology: Commentary". In : *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 11, No. 2, 215-217.
- Wolfe, J. 2002. "A thousand dots of light". In : *Forbes/Wolfe Nanotech Report*, Avril. <http://www.qdots.com/new/news/articles/0529.html> (accès 1^{er} novembre 2005)

Chapitre 5

ÉTHIQUE, NANOTECHNOLOGIE ET SANTÉ

Donald Evans

L'émergence de nouvelles technologies promettant de remarquables bienfaits pour la santé s'est considérablement accélérée au cours des 40 dernières années. Le plus remarquable a été la découverte de l'ADN, suivie de celle du séquençage du génome humain et de l'invention des techniques de fécondation *in vitro* ou FIV. Prises séparément ou ensemble, ces techniques ont généré d'autres technologies et des recherches qui, à leur tour, ont stimulé nombre de discussions éthiques.

Dans le cas de la génétique, par exemple, le développement de la pharmacogénétique a offert la possibilité d'assortir de manière plus précise des agents pharmaceutiques à certaines catégories de patients. D'importantes questions s'en sont suivies sur la collecte et l'utilisation de tissus humains, ainsi que sur leur exploitation destinée à la production de remèdes. Les questions portant sur la vie privée, le consentement éclairé et le partage des bénéfices ont dominé ces discussions. La FIV nous a obligés à sérieusement réfléchir sur le statut moral de l'embryon à son stade précoce, s'il pouvait être créé pour la recherche et utilisé par elle, vendu, sélectionné en raison de diverses qualités et utilisé pour le bien d'autres personnes. La disponibilité d'embryons *in vitro* a très largement stimulé l'émergence des technologies des cellules souches. Les questions éthiques ainsi soulevées par la protection de la dignité humaine, la souffrance causée à un être humain et la commodification d'êtres humains font encore l'objet de débats très intenses.

Ces deux technologies se sont conjuguées dans des programmes d'intervention sanitaire tels que les tests et les dépistages de la pré-

implantation génétique. Ceci soulève les questions concernant l'incapacité et la dignité, ainsi que la valeur de la vie des personnes souffrant d'incapacité et a enflammé les discussions sur la distinction entre le fait de contribuer au bien-être des gens et celui de les « améliorer ».

À ce cadre déjà moralement contesté, s'ajoute maintenant une technologie très prometteuse pour la santé humaine, la nanotechnologie.

VÉRITÉS ET CONTREVÉRITÉS

L'évaluation éthique de cette technologie soulève de nombreuses difficultés. En effet, à ce stade précoce, il est impossible de facilement distinguer entre, d'une part, le battage entourant les promesses et les possibilités, à la fois positives et négatives, qui seront ici discutées et, d'autre part, ce qui est ou serait vraiment possible. C'est pourquoi nous avons beaucoup à apprendre des technologies mentionnées plus haut, celles qui ont précédé la nanotechnologie.

En ce qui concerne la génétique, il serait intéressant de noter que cette nouvelle science est prometteuse de toutes sortes d'interventions sanitaires étonnantes grâce à l'ingénierie génétique pour soigner des maladies telles que la mucoviscidose. Ces traitements peuvent encore progresser, mais leur développement s'est révélé de loin plus problématique que cela ne l'avait été suggéré par leur publicité. Bien que des moyens très divers de diagnostic existent dans ce domaine, il n'est encore guère possible, à ce jour, de corriger des anomalies provenant des déficiences génétiques identifiées, si ce n'est en évitant de donner naissance à ceux qui pourraient en être affectés. Cette dernière solution est elle-même une réponse, contestée et contestable, à ce type de problème.

Dans le cas de la FIV, personne ou presque n'aurait pu prévoir les divers progrès qu'a entraînés la disponibilité d'embryons humains à leur stade précoce dans les laboratoires. Ce qui était une technique développée surtout pour soulager la détresse de couples non fertiles a considérablement enrichi nos connaissances de l'embryologie humaine à son stade précoce, ainsi qu'à ses diverses applications, dont l'utilisation de cellules souches embryonnaires dans la recherche et, comme on l'espère, diverses thérapies.

Le potentiel de la nanotechnologie soulève un extrême optimisme auquel répond un pessimisme non moins extrême. Du côté de l'hypertimisme, l'on trouve les prédictions suivantes :

Théoriquement, la nanomédecine éliminera toutes les maladies courantes du xx^e siècle, toutes les souffrances médicales ou autres, et elle permettra d'améliorer les capacités humaines – tout particulièrement nos capacités mentales.

Un appareil nanostructuré [...] d'environ la taille d'une cellule de foie humain [...] pourrait stocker une somme de données équivalente à la totalité de la bibliothèque du Congrès. Implanté quelque part dans le cerveau humain et possédant des interfaces appropriées, un tel appareil permettrait d'accéder très rapidement à ces données.

Le bénéfice à long terme le plus important pour la société humaine dans son ensemble serait l'avènement d'une nouvelle ère de paix. En effet, l'on peut espérer que des personnes bien nourries, bien vêtues, bien éduquées, heureuses et en bonne santé ne soient guère motivées pour se faire la guerre. (Freitas, 1998)

C'est l'inventeur de cette technologie ou, du moins, le scientifique qui en inventa le nom (Drexler, 1986) qui lança les cris d'alarme les plus épouvantables la concernant. Il envisagea la création de nanorobots capables de s'autorépliquer et de littéralement dévorer toute vie organique. L'auteur de ce scénario apocalyptique, où tout deviendrait de la *grey goo*, « gelée ou glu grise », et qui a frappé l'imagination de nombreux auteurs de science-fiction, s'est récemment quelque peu distancé de cette prédiction (Phoenix et Drexler, 2004), (Bear, 2005).

Nous devons toutefois tenir compte de résultats plus plausibles concernant la relation entre la nanotechnologie et la santé. Pour corriger de manière plus sobre l'optimisme concernant les bénéfices sanitaires de la nanotechnologie, considérons maintenant certaines possibilités envisagées par deux des chercheurs travaillant dans le Centre de nanotechnologie biologique et environnementale de l'université Rice (Rice University's Center for Biological and Environmental Technology) :

Nous avons au moins conclu que quoique ces choses (les nanomatériaux) puissent faire, elles ne sont pas inertes. Que produiront-elles lorsqu'elles seront dans l'environnement, et qu'elles pénétreront dans le corps des gens ? (Vicki Colvin, cité dans Brown, 2002)

Jusqu'où ce truc ira-t-il ? Quelle sera son interaction avec l'environnement ? Est-ce que ce sera le prochain meilleur truc pour le pain à toasts, ou pour l'amiante ? Nous savons que les cellules absorbent les nanomatériaux. Il y a de quoi s'alarmer. Si les bactéries peuvent les absorber, alors

les nanomatériaux peuvent se faufiler dans la chaîne alimentaire. (Mark Wiesner, cité dans Brown, 2002)

Un autre chercheur de ce centre, Jennifer West, prévient que des protéines peuvent s'attacher à la surface de nanoparticules dans le sang et avoir ainsi de dangereuses conséquences, notamment le coaguler. De plus, ce chercheur déclare que les bactéries absorbant ces particules pourraient faciliter la pénétration d'autres dangereux matériaux dans le corps et que, de la même façon, des éléments toxiques pourraient se répandre dans l'environnement (ETC Group, 2002). Comme nous le verrons, ce genre de risques devient particulièrement inquiétant si des interventions médicales impliquent l'introduction de nanoparticules chez des patients.

TIRER DES LEÇONS DU PASSÉ

Nous pourrions apprendre plus encore du débat éthique qui avait entouré la FIV et la recherche sur l'ADN. Nombre de problèmes éthiques soulevés par ces technologies se trouvent au cœur des craintes éthiques concernant la nanotechnologie et ses applications dans le domaine de la santé. L'on peut dire qu'en général, ces dernières les ont intensifiées. Les débats suscités par ce domaine ne sont pas partis de rien, comme cela a été le cas d'un grand nombre de ceux concernant la FIV et la génétique. S'agissant de la réflexion éthique sur la nanotechnologie, nous pouvons beaucoup apprendre de ce que l'identification des questions éthiques a dit à leur sujet, ainsi que sur leurs traitements. Examinons deux exemples.

Tout d'abord, nous avons déjà fait allusion au développement des tests et dépistages de la pré-implantation génétique qui sont issus de leur combinaison, tous deux inventés avant la nanotechnologie. L'on promet que la nanotechnologie nous offrira des méthodes d'examen génétique plus rapides et moins coûteuses que celles actuellement disponibles. Leur coût et le nombre insuffisant d'experts pour offrir ce service font partie des limites restreignant son utilisation chez des patients. La nanotechnologie pourrait bien faire prochainement disparaître ces barrières, accroissant ainsi la pression sur ce type de service. En conséquence, les problèmes éthiques majeurs concernant la vie privée et la confidentialité, le consentement éclairé, la propriété de l'information génétique, le droit à l'information et les risques à établir un profil génétique, s'en trouveraient grandement intensifiés.

Un second exemple nous est fourni par la génétique où, comme nous l'avons vu, l'ingénierie destinée à corriger des défauts génétiques chez des êtres humains en développement a beaucoup promis. Parvenir à effectuer de telles modifications aux premiers stades du développement humain pourrait assurer une croissance plus saine. Mais jusqu'à quel point cette ingénierie peut-elle suffire ? S'agit-il d'essayer de restaurer chez un embryon ou un fœtus son potentiel « normal » ? Et comment ces modifications génétiques assureraient-elles le développement du même individu ? Cela n'aurait-il pas pour résultat qu'il devienne une autre personne ? Les nanotechnologues ont aussi annoncé pouvoir remédier à des problèmes sanitaires grâce à la nanoingénierie. Par exemple, comme cela a déjà été mentionné, l'on a suggéré que l'insertion de nanoparticules « intelligentes » (*smart*) dans le cerveau pourrait permettre de restaurer le potentiel normal d'un fœtus risquant de souffrir d'un développement intellectuel insuffisant. Mais qu'est-ce que la normalité ? Qui en décide ? S'il est possible de dépasser cette « norme » et d'obtenir un plus grand potentiel chez l'enfant en train de se développer, devons-nous le faire ? Des questions sur le rôle réel de la médecine dans ce domaine ont été discutées pendant un certain temps dans le cadre de l'ingénierie génétique. Est-ce de l'eugénisme ? Et si c'est le cas, est-ce une erreur ? Les distinctions sont minces concernant les possibilités de la nanotechnologie, si ce n'est leur échelle. Nous devons encore une fois considérer ici ce qu'est la nature des personnes et nos réactions morales envers des êtres humains modifiés par notre ingénierie, mais peut-être aussi en vue de découvrir des possibilités plus radicales.

Lorsqu'on examine les dimensions éthiques du développement des nanotechnologies, nous devons garder à l'esprit les principes de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* de l'UNESCO, qui vient récemment d'être adoptée (UNESCO, 2005).

LA NANOTECHNOLOGIE ET LA SANTÉ PUBLIQUE

Examinons maintenant comment les développements de la nanotechnologie pourraient affecter la santé publique.

La nanotechnologie, une menace pour la santé publique

La nanotechnologie soulève certaines questions éthiques concernant la santé, bien qu'elles n'aient pas été clairement précisées au sujet des technologies génétiques ou en relation avec la FIV. Ces questions sont

apparues avec l'introduction de nanosubstances dans l'environnement, y entraînant ainsi des risques. Les nanotechnologies comprennent la production et l'utilisation de nouveaux matériaux qui, à cause de leur nature même, pourraient représenter des menaces pour la santé publique. Dans la mesure où ce serait exact, cela marque une certaine différence avec la science génétique et la création d'embryons *in vitro* et nous rapproche ici bien plus du développement et de l'utilisation de la science nucléaire où les matériaux produits et utilisés par les technologies en résultant sont eux-mêmes porteurs de risques potentiels pour la santé humaine.

Quels sont ces produits et pourquoi sont-ils dangereux ? La nanotechnologie repose sur des quantités de matière incroyablement petites, allant jusqu'à un milliardième de mètre. L'industrie s'intéresse à la production de particules de cette taille provenant de composés déjà existants, ainsi qu'à celles provenant de matériaux qui, modifiés, n'existent donc pas naturellement. Ce qui surprend souvent, c'est que ces très petites quantités de matériaux se comportent de façon totalement différente que les volumes plus importants qui nous sont familiers. L'on pourrait s'attendre à ce qu'elles aient les mêmes qualités, voire à des degrés inférieurs, que celles de matériaux plus volumineux. Or, nous savons maintenant que, sous un volume infime, elles possèdent des qualités différentes, par exemple la couleur, ou bien les mêmes qualités, par exemple de force, de réactivité chimique et de conductibilité électrique, mais à des degrés largement supérieurs. En fait, c'est en partie pourquoi elles sont si utiles.

Bien que la génétique soit réputée travailler sur les matériaux de construction de la vie, les nanoparticules sont, elles, considérées comme les matériaux de construction de tout ce qui existe. Leur taille minuscule leur permet aussi, lorsqu'elles pénètrent dans le système sanguin, de traverser la barrière hémato-encéphalique (BHE). Elles sont si petites qu'elles ne peuvent même pas être détectées par les appareils les plus sensibles et, de toute évidence, pas par les personnes qui, d'une façon ou d'une autre, auraient pu être envahies par elles.

Les qualités si utiles des nanoparticules entraînent la tentation de les employer aussi rapidement que possible. Par exemple, elles sont déjà commercialisées dans des peintures et des produits cosmétiques. Ce sont des catalyseurs bien plus efficaces que ceux actuellement utilisés pour raffiner le pétrole et leur potentiel dans ce secteur est donc énorme. Les nanotubes de carbone apportent leur résistance et

c'est pourquoi il est prévu de les utiliser dans la production des pneus. De nombreuses entreprises les utilisent par tonnes. Les nanoparticules sont aussi présentes, par exemple, dans des crèmes de protection solaire à cause de leur résistance aux UV. La Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis ne dispose cependant d'aucun protocole pour évaluer si elles ne présentent pas de danger bien que, dans ce pays, tous les produits contenant des crèmes solaires soient soumis, comme les médicaments, à des réglementations (ETC Group, 2002). Le fait que ces produits soient déjà mis en vente ne garantit pas pour autant qu'ils puissent être utilisés en toute sécurité. La FDA a approuvé l'utilisation d'oxyde de zinc dans les écrans solaires, sans restriction concernant sa taille et malgré la preuve qu'il a des effets phototoxiques sur les cellules et sur l'ADN de mammifère cultivées *in vitro* (Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004, p. 44). Le Comité scientifique des produits cosmétiques et des produits non alimentaires destinés aux consommateurs (SCCNFP) de la CEE a recommandé de procéder à d'autres recherches *in vivo* afin de clarifier ces découvertes et de fournir des données fiables sur l'absorption d'oxyde de zinc par la peau (SCCNFP, 2003). La recherche européenne a démontré qu'il existe des raisons de s'inquiéter à ce sujet (Dunford *et al.*, 1997). En attendant qu'une évaluation des risques soit disponible, ceux auxquels le relâchement de ces particules dans l'environnement peut exposer la santé publique restent des points d'interrogation. Certaines publications en font ainsi état :

Nous considérons que les producteurs de nanomatériaux ont le devoir d'élaborer pour ces nanosubstances des tests de toxicité pertinents et conformes aux directives internationales sur l'évaluation des risques. Même des agents chimiques « anciens » peuvent nécessiter d'être réévalués si leur état physique est substantiellement différent de ceux qui existaient lorsqu'ils avaient été en premier lieu évalués. (Hoet *et al.*, 2004)

Ces matériaux peuvent pénétrer facilement dans le corps. Ils peuvent aussi pénétrer facilement dans les cellules et nous ignorons tout simplement quels effets ils peuvent y avoir. Les scientifiques travaillant sur l'environnement sont préoccupés par le fait, maintenant reconnu, que les interactions des nanoparticules avec le vivant sont différentes de celles de matériaux de plus grande taille (Brown, 2002). Il est établi que l'inhalation de nanoparticules suffit pour qu'on les retrouve dans le cerveau de rat et que cela se produit probablement *via* le nerf olfactif

(Obderdörster *et al.*, 2004). Il a été démontré, en outre, que des *buckyballs* (ou nanoparticules de carbone) non enrobées peuvent endommager les lipides et les protéines du cerveau d'espèces aquatiques (Obderdörster *et al.*, 2004). Ce type de dommages a été mis en relation avec la maladie d'Alzheimer.

Les scientifiques cherchent à rendre ces particules inoffensives en les enrobant pour certaines de leurs applications. Cela sera nécessaire si elles doivent être utilisées dans le domaine thérapeutique, comme nous en discuterons plus loin. Des décisions doivent être prises concernant la sécurité environnementale avant que des pays ne se précipitent pour produire et utiliser sans discrimination les nanomatériaux. Ces décisions devraient tenir compte de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme*, notamment des articles suivants :

Article 16 - Protection des générations futures

L'incidence des sciences de la vie sur les générations futures, y compris sur leur constitution génétique, devrait être dûment prise en considération.

Article 17 - Protection de l'environnement, de la biosphère et de la biodiversité

Il convient de prendre dûment en considération l'interaction entre les êtres humains et les autres formes de vie, de même que l'importance d'un accès approprié aux ressources biologiques et génétiques et d'une utilisation appropriée de ces ressources, le respect des savoirs traditionnels, ainsi que le rôle des êtres humains dans la protection de l'environnement, de la biosphère et de la biodiversité.

La nanotechnologie et sa contribution à la santé publique

Trois domaines de la santé publique peuvent largement bénéficier des progrès de la nanotechnologie. Le premier contrebalance directement les risques environnementaux mentionnés plus haut.

Contribution de la nanotechnologie à la sécurité environnementale

De nombreux polluants se trouvent déjà dans l'environnement. Malgré les craintes concernant, comme nous l'avons précédemment mentionné, la possibilité que les problèmes de pollution empirent à cause du développement et de l'usage généralisé des nanoparticules, utiliser la nanotechnologie pourrait permettre de dépolluer l'environnement de manière plus efficace qu'on n'y ait jamais pensé.

Concernant la santé publique, c'est l'approvisionnement en eau saine qui peut en bénéficier de la façon la plus spectaculaire. Alors que le monde développé pense que l'approvisionnement en eau potable va de soi, le nombre de morts résultant de la consommation et de l'utilisation d'eau impure dans le monde éclipse celui dû à toute autre cause, y compris la famine et le VIH/sida. Selon les estimations de la Banque mondiale, plus de la moitié de la population mondiale ne dispose pas des moyens essentiels d'assainissement et environ 1,5 milliard de personnes n'ont pas accès à de l'eau saine. C'est pourquoi 80 % des maladies dans le monde en développement trouvent leur origine dans une mauvaise qualité de l'eau. L'on estime que 3,4 millions de morts résultent de cette situation chaque année, dont la majorité des victimes sont des enfants (Foresight Nano Institute, 2006).

Ces polluants se présentent sous des formes diverses, à la fois organiques et non organiques. Si les bactéries et les virus jouent un rôle majeur, le pétrole et d'autres polluants organiques, ainsi que divers métaux lourds en sont aussi responsables (Singer *et al.*, 2005, p. 58-59). Plusieurs solutions prometteuses proviennent de la nanotechnologie, notamment les suivantes :

La production de membranes « intelligentes » permet la production de filtres portables, de prix accessible et destinés à filtrer la plupart des contaminants, y compris les bactéries et virus. Ces matériaux sont 10 000 fois plus efficaces pour retenir les bactéries et les toxines que le charbon activé.

Des nanoaimants, enrobés de divers revêtements, sont conçus pour traiter des polluants spécifiques, y compris le pétrole, et pour en dépolluer l'eau. Ces préparations semblables à de la poussière pourraient être répandues sur de larges superficies, puis en être enlevées, avec une efficacité de presque 100 %.

Des nanoparticules de magnétite (aimant) combinées à de l'acide citrique pourraient dépolluer l'eau des métaux lourds qui s'y trouvent.

La perspective d'éviter de terribles maladies telles que le choléra et le typhus, ainsi que la gastroentérite commune, à de vastes populations qui en souffrent ou en meurent soulève un grand enthousiasme. Mais cela pourra-t-il se réaliser ?

Pour que cela soit possible, le monde développé devra accorder la plus grande attention à la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* et, en particulier, aux articles suivants :

Article 10 - Égalité, justice et équité

L'égalité fondamentale de tous les êtres humains en dignité et en droit doit être respectée de manière à ce qu'ils soient traités de façon juste et équitable.

Article 13 - Solidarité et coopération

La solidarité entre les êtres humains ainsi que la coopération internationale à cette fin doivent être encouragées.

Article 14b - Responsabilité sociale et santé

2. Compte tenu du fait que la possession du meilleur état de santé qu'il est capable d'atteindre constitue l'un des droits fondamentaux de tout être humain, quelles que soient sa race, sa religion, ses opinions politiques ou sa condition économique ou sociale, le progrès des sciences et des technologies devrait favoriser [...] (b) l'accès à une alimentation et à une eau adéquates.

Article 15 - Partage des bienfaits

1. Les bienfaits résultant de toute recherche scientifique et de ses applications devraient être partagés avec la société dans son ensemble ainsi qu'au sein de la communauté internationale, en particulier avec les pays en développement.

Malgré cela, les retours financiers dont pourraient bénéficier les producteurs de nanotechnologies risquent de les tenter de se centrer sur les progrès qui en promettent de plus importants encore à leurs investisseurs. Si c'est le cas, l'écart entre nations riches et nations pauvres deviendra alors plus grand et une remarquable opportunité de rendre notre monde meilleur aura été manquée. Singer *et al.* (2005, p. 64) a décrit de manière très précise ce qui se produirait alors :

La nanotechnologie entraînera-t-elle une « nanodivision » du monde ? Les fonds pourraient être investis en priorité dans la production de nano-écrans solaires, de nanopantalons et de nano-ascenseurs dont bénéficieraient les 600 millions d'habitants des pays riches, bien que cela ne soit pas joué d'avance. Les applications de la nanotechnologie pourraient bientôt permettre de résoudre les besoins de santé, de nourriture, d'eau et d'énergie des 5 milliards d'habitants du monde en développement.

La nanotechnologie, une ressource pour l'épidémiologie et la santé publique
L'épidémiologie s'occupe des populations plutôt que des individus. Elle cherche à mieux comprendre l'étiologie des maladies en étudiant leurs

tendances ; cela implique d'accéder facilement aux données sanitaires portant sur de très grands nombres de patients. En tant que telle, elle est d'un grand intérêt pour la santé publique, bien qu'à long terme ce sont des patients individuels qui bénéficient de ses découvertes.

Ainsi, plutôt que sur des patients individuels, les activités de santé publique se centrent sur une population dans son ensemble ou *herd* en anglais – d'où l'expression de *herd immunity* ou « immunité collective » pour désigner l'effet pare-feu des vaccinations, par exemple contre la coqueluche. Toutefois, lorsqu'un médecin propose à une mère de vacciner son enfant, le meilleur résultat n'est pas garanti. En effet, certaines réactions à ce vaccin peuvent malheureusement causer de graves dommages cérébraux. Néanmoins, vacciner une certaine partie de la population produit un effet pare-feu (*herd immunity*) qui enrayer une épidémie probable – ce qui est alors dans l'intérêt de tous les enfants d'une population donnée.

De la même façon, lorsque des campagnes de dépistage sont lancées, par exemple pour dépister le cancer du col de l'utérus, il est alors important de pouvoir suivre l'histoire médicale des femmes examinées afin d'évaluer leur efficacité. Une fois encore, le but de cet exercice n'est pas le bien-être de patients individuels, mais le succès du programme pour la population dans son ensemble.

Comment la nanotechnologie peut-elle soutenir ce type d'activités ? Plusieurs développements de la nanotechnologie sont réalisables dans les domaines du diagnostic et de la technologie de l'information qui, conjugués, seraient d'une grande aide pour les épidémiologistes. Par exemple, la production et l'insertion de nanoparticules informatisées chez des patients sont constamment proposées comme pouvant informer de manière précoce des développements de certaines maladies. Ce n'est pas réellement une surprise, car les protéines elles-mêmes pourraient être considérées comme des nanomachines remplissant des fonctions hautement spécifiques dans presque tous les processus biologiques, sensoriels, métaboliques, informatifs et de transport moléculaire (Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004, p. 20). La nanotechnologie cherche simplement à répliquer ces « machines » naturelles au niveau moléculaire. De plus, ces nanomachines informatisées peuvent être soumises à un contrôle externe. Par exemple, les médecins traitants peuvent les manipuler de plusieurs façons pour administrer des traitements à leurs patients, notamment pour que ces derniers reçoivent les substances thérapeutiques selon ce qui leur est exactement nécessaire.

Ce moyen permet aussi de les suivre de loin par télétraitement (Mertz, 2001). Une telle possibilité serait très utile dans les audits des actions de santé publique et dans la recherche épidémiologique. Cependant, étant donné la taille de ces particules, les patients pourraient ne pas être même conscients d'en transporter dans leur corps, voire d'être sous surveillance et cela peut-être jusque dans leur vie la plus intime. Ce genre de scénario soulève évidemment d'importantes questions concernant la vie privée, la confidentialité et le consentement éclairé.

Ce tiraillement entre, d'une part, les intérêts et les droits du patient et, d'autre part, les intérêts de la santé publique n'est pas nouveau. Une discussion est donc nécessaire pour déterminer comment gérer ce problème afin de protéger l'autonomie individuelle sans rendre impossibles les actions de santé publique. Les questions ainsi soulevées comprennent le consentement éclairé, les méthodes d'approche du patient pour collecter les données, l'utilité de distinguer les données identifiables de celles qui ne le sont pas, l'accès restreint à des informations non pertinentes ou non restreintes, bien précisé sur le consentement écrit du patient, ainsi que l'accès restreint aux seules personnes autorisées. Les capacités offertes par la nanotechnologie pour collecter de nouvelles données rendent ces débats éthiques plus intenses, car elles semblent poser de grandes menaces aux libertés publiques.

À cet égard, les articles 3 et 6 de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* devront être pris en compte pour élaborer les politiques publiques sur la nanotechnologie.

Article 3 - Dignité humaine et droits de l'homme

1. La dignité humaine, les droits de l'homme et les libertés fondamentales doivent être pleinement respectés.
2. Les intérêts et le bien-être de l'individu devraient l'emporter sur le seul intérêt de la science ou de la société.

Article 6 - Consentement

1. Toute intervention médicale de caractère préventif, diagnostique ou thérapeutique ne doit être mise en œuvre qu'avec le consentement préalable, libre et éclairé de la personne concernée, fondé sur des informations suffisantes. Le cas échéant, le consentement devrait être exprès et la personne concernée peut le retirer à tout moment et pour toute raison sans qu'il en résulte pour elle aucun désavantage ni préjudice.
2. Des recherches scientifiques ne devraient être menées qu'avec le consentement préalable, libre, exprès et éclairé de la personne concernée. L'information devrait être suffisante, fournie sous une forme compréhensible.

sible et indiquer les modalités de retrait du consentement. La personne concernée peut retirer son consentement à tout moment et pour toute raison sans qu'il en résulte pour elle aucun désavantage ni préjudice. Des exceptions à ce principe devraient n'être faites qu'en accord avec les normes éthiques et juridiques adoptées par les États et être compatibles avec les principes et dispositions énoncés dans la présente Déclaration, en particulier à l'article 27, et avec le droit international des droits de l'homme.

La nanotechnologie, soutien à la surveillance sanitaire des populations

Une autre forme de dépistage de la santé publique doit être considérée de manière séparée ; il s'agit du dépistage génétique d'une communauté ou d'une population. Cette possibilité, en particulier s'agissant du dépistage néonatal, a été évoquée avec une régularité croissante au cours de la dernière décennie, pour diverses raisons. D'une part, il a été affirmé qu'élargir la couverture de ce dépistage offrirait aux populations la possibilité de mieux choisir leurs styles de vie, sociaux et privés, y compris le choix d'avoir ou non une progéniture. D'autre part, il a été suggéré que plus d'informations de cette sorte étant offertes aux personnels sanitaires, de plus nombreux objectifs seraient atteints afin, notamment, de réduire le nombre de naissances d'enfants atteints de malformations génétiques, de faciliter la planification et l'amélioration des soins entourant les naissances des générations suivantes et de mieux planifier les programmes de recherche concernés.

Aussi louables ces objectifs puissent-ils paraître, chacun d'eux soulève des défis éthiques considérables. Quels qu'ils soient, ces programmes n'en sont pas moins soumis à la loi des rendements décroissants (*diminishing returns*). Par exemple, différentes analyses génétiques sont maintenant offertes aux couples risquant d'avoir des enfants atteints de malformations génétiques. Ces analyses coûtent cher et leur spécificité est très élevée. Les mettre à disposition d'un plus grand nombre permettrait d'obtenir un nombre d'analyses positives proportionnellement plus petit. Plus le filet serait grand, plus petites seraient les prises pour un investissement plus important. En effet, le coût par résultat positif augmenterait exponentiellement (Evans, 1996, p. 163-164). Le coût prohibitif de ce genre de programme est la raison qui a le plus dissuadé de les introduire. La nanotechnologie pourrait toutefois changer cette situation de manière spectaculaire.

Actuellement, l'on estime qu'établir la carte complète d'un génome (un très long processus) coûterait 5 millions de livres (£) et

que le prix de la carte de 5 % d'un génome qui pourrait comporter des risques médicaux s'élèverait à £ 250 000. Il est annoncé que, promettant de réduire considérablement les fonds et le temps consacrés à cette méthode, la nanotechnologie ouvrirait les portes à une recherche génétique à grande échelle, rapide et financièrement abordable. C'est le propos de Sheremeta (2004, p. 50-51) :

Des méthodes standard d'analyse requièrent des échantillons de grande taille et des réactions de longue durée pour amplifier la séquence génétique pertinente en utilisant la réaction en chaîne polymérase ou PCR. Des méthodes d'analyse microfluidiques rapides et exécutées sur de petits échantillons biologiques sont en train d'être développées.

Sheremeta se réfère à des articles publiés sur cette recherche annonçant que des puces microfluides peuvent maintenant être produites pour utiliser la PCR (Obeid *et al.*, 2003, p. 288) ; cela rendrait possible une analyse séquentielle à haut rendement (Demello, 2003), capable de lire deux millions de données à la seconde, permettant ainsi de séquencer un génome entier en deux heures.

Cette invention rendrait possible et financièrement abordable l'analyse de la population constituée par les nouveaux-nés, par exemple. Les obstacles financiers étant levés, une importante pression publique se manifesterait probablement pour lancer ce genre de programme. En conséquence, toutes les discussions éthiques et juridiques tenues jusqu'alors à un rythme relativement tranquille, tandis qu'une analyse génétique spécifique ne pouvait être proposée qu'à une infime minorité de patients, s'intensifieraient rapidement.

Quelles seraient-elles donc ? Pour des raisons de commodité, nous regrouperons les sujets de discussion les plus notables en trois catégories. Un premier groupe concerne la question du consentement ; un deuxième, les bénéfices à long terme pour les nouveaux-nés que ce type d'analyse, dit-on, permettrait ; et un troisième traite de la nature des connaissances acquises grâce à ces analyses, ainsi que de leurs conséquences pour les patients et leur famille.

La question du consentement. Si ces analyses devenaient pleinement opérationnelles et d'une utilité maximale, tous les nouveaux-nés devraient alors y être soumis. Par exemple, plus grand serait le nombre de ces analyses, moins il y aurait de chances que les chercheurs tirent des conclusions générales sur les relations entre les prédispositions génétiques et les données sociales et démographiques. Toutefois, il est

clair qu'aucune justification éthique n'existe pour obliger les gens à s'impliquer soit dans une telle recherche, soit dans des interventions préventives ou thérapeutiques. L'article 6 de la *Déclaration universelle* déjà mentionnée, et dont les deux premiers paragraphes ont déjà été cités, l'énonce clairement dans son premier paragraphe :

Article 6 - Consentement

1. Toute intervention médicale de caractère préventif, diagnostique ou thérapeutique ne doit être mise en œuvre qu'avec le consentement préalable, libre et éclairé de la personne concernée, fondé sur des informations suffisantes. Le cas échéant, le consentement devrait être exprès et la personne concernée peut le retirer à tout moment et pour toute raison sans qu'il en résulte pour elle aucun désavantage ni préjudice.

Étant donné l'impossibilité d'obtenir le consentement de nouveaux-nés, certains problèmes particuliers concernant l'analyse génétique néonatale exigent être commentés ici. Les parents sont chargés de fournir leur consentement ou d'obtenir celui de leur enfant pour que celui-ci subisse des examens médicaux et des interventions thérapeutiques. En effet, l'on estime que, plus que n'importe qui d'autre, les parents ont à cœur les intérêts de leurs enfants. Le consentement des parents pour que leur enfant participe à la recherche n'est pas explicite, lui, car l'on ne peut pas affirmer que ce type de recherche soit dans son intérêt spécifique. Outre cette difficulté, créer le profil génétique d'un enfant dès sa naissance comprend la possibilité que les parents ne puissent baser leur consentement en son nom. En effet, comment des parents pourraient-ils déterminer ce que cet enfant penserait, plus tard, de ce qui aurait pu être dans son intérêt au moment de sa naissance ? Étant donné les divers fardeaux que la connaissance de son propre profil génétique pourrait imposer, notamment une gêne vis-à-vis de la société, ou des limites à certaines libertés fondamentales pour obtenir une assurance, un emploi, voire un certain type d'éducation, de nombreuses personnes préfèrent ne pas être informées des probabilités génétiques qui sont les leurs (Evans, 1999). Le nouveau-né n'étant pas en position de refuser cette analyse, les résultats lui seront soumis ou à ceux qui s'occupent de lui, mais plus tard, car cela sera inscrit dans son dossier médical.

Lorsqu'une analyse génétique est proposée aux patients, un entretien a lieu afin de leur en expliquer les conséquences, ainsi que celles des résultats positifs éventuels. Leur décision est prise à la lumière de

ces informations. Les nouveaux-nés sont dans l'incapacité totale de participer à ce processus.

Alors que le consentement parental est nécessaire pour procéder à une analyse génétique pour des états importants pour le développement de l'enfant, il en va autrement quand cette analyse concerne des états qui pourraient, même sans certitude, se développer pendant la vie adulte du nouveau-né – ce sont en quelque sorte des options pour le nouveau-né lorsqu'il aura atteint sa maturité.

L'une des protections offertes aux patients s'impliquant dans des essais cliniques et se soumettant à des interventions thérapeutiques est de pouvoir réviser leur consentement, d'abandonner les essais ou de refuser de poursuivre le traitement. S'il est impossible de conserver des informations génétiques spécifiques provenant d'adultes qui ont choisi de les recevoir, il est à tout le moins possible de dire que ce choix est volontaire. Pour d'autres raisons plus importantes, ces possibilités ne peuvent pas être proposées à un nouveau-né subissant une analyse génétique.

Ces considérations négatives doivent contrebalancer les avantages espérés pour le nouveau-né ainsi examiné. Elles pourraient être prises en compte lorsqu'il s'agit de juger de ce qui est dans l'intérêt d'un enfant incompetent.

Avantages espérés pour le nouveau-né. Le *Livre blanc* du Département de la santé du Royaume-Uni (UK Department of Health's White Paper, 2003), auquel la Commission sur la génétique humaine a répondu dans son rapport sur le profilage génétique (HGC, 2005), se réfère à l'analyse du génome complet d'une personne afin de découvrir la majorité de ses variations génétiques. La signification de quelques-unes de ces variations seulement est maintenant connue. Au fur et à mesure que le nouveau-né avance vers l'âge adulte, il ne fait aucun doute que l'on en saura plus à ce sujet. Si ces variations étaient notées dans son dossier médical, la personne concernée demanderait de bénéficier de ces premières indications sur sa propension à développer certaines maladies ou, peut-être, de savoir comment modifier sa manière de vivre afin d'éviter de développer ces prédispositions. Cela offrirait à ce type de patients un avantage considérable. Par ailleurs, il peut aussi arriver que la preuve des liens causaux ne corresponde pas aux progrès permettant d'identifier des maladies encore non découvertes. Effectivement, cela s'avère souvent exact pour des gènes marqueurs déjà identifiés.

En ce cas, connaître la prédisposition d'une personne à souffrir de certaines maladies pourrait devenir un fardeau plutôt qu'un avantage, sauf si cela lui offrait plus de libertés. Par exemple, dans certains cas (en particulier dans celui de la maladie de Huntington), avoir la certitude qu'une maladie peut se développer ou qu'on en est porteur pourrait aider à prendre la décision d'avoir ou non des enfants. Dans la plupart des cas, les probabilités inhérentes à la possession d'un gène marqueur tendront à limiter les libertés fondamentales comme cela a été évoqué plus haut.

Le développement de la pharmacogénomique promet aussi de promouvoir le bien-être des nouveaux-nés dont on connaît le profil génétique. Un nombre plus important de soins correspondant à certains groupes de patients leur permettraient d'en bénéficier ou, du moins, d'éviter de souffrir de réactions négatives inacceptables pour eux, en utilisant la méthode des compatibilités génétiques. Leur profil génétique ayant été déterminé par une analyse néonatale, les patients pourraient plus tard éviter les caprices des prescriptions données par approximations successives qu'ils risqueraient de recevoir autrement.

Connaître une prédisposition à une maladie pour laquelle aucun traitement n'est encore connu est souvent considéré comme un désavantage, excepté dans des cas analogues à celui de la maladie de Huntington. Toutefois, étant donné la durée de vie que l'on souhaite naturellement à des nouveaux-nés, des traitements plus adéquats pourraient exister plus tard, tandis que leur santé reste sous surveillance.

Certains doutes subsistent pour décider si le fait que des parents connaissant le profil génétique de leur enfant puisse avoir des effets positifs. S'il semble que cela permette d'avertir les parents de certains dangers et de soigner ainsi au mieux leur enfant, il est prouvé que connaître ses prédispositions pour développer une maladie peut les rendre trop protecteurs. Cela peut avoir des effets déstabilisateurs sur le bien-être de l'enfant qui reste alors prisonnier du rôle de patient (Kerruish et Robinson, 2005).

Prévoir les soins qui seront donnés est l'avantage plus général de l'analyse génétique. Plus nombreuses sont les informations dont peuvent disposer les planificateurs sur les profils des maladies dans une société, mieux ils seront capables de planifier les services de santé nécessaires pour faire face à ces développements. La prédisposition génétique n'étant qu'une des caractéristiques du développement d'une maladie, il n'apparaît pas clairement que des données statistiques soient

très utiles. Cela peut même aller à l'encontre des intérêts des nouveaux-nés qui pourraient développer des maladies plus rares que celles pour lesquelles des services spécifiques existent déjà, car la tentation constante des planificateurs est d'obtenir un gain sanitaire maximum des fonds investis dans la santé publique. Cela soulève de sérieuses questions sur la justice distributive dans les soins de santé (Evans, 1993).

De plus, le fait que des patients possèdent leur profil génétique pourrait avoir un effet adverse sur les planificateurs et devenir un obstacle pour prévoir des services de santé suffisants. Le syndrome du patient anxieux à juste titre pourrait se manifester. Cela peut avoir un double effet. Tout d'abord, les services sanitaires recevraient des demandes auxquelles ils ne pourraient faire face, en raison des anxiétés que génère le fait de connaître sa génétique. Des patients connaissant leurs fragilités génétiques et ressentant des douleurs ou une souffrance qu'il serait concevable de mettre en relation avec leur génétique demanderaient vraisemblablement de subir des examens pour traiter leur problème aussitôt que possible. Le nombre de fausses alarmes dépasserait alors très largement le nombre de symptômes authentiques et cela deviendrait un nouveau fardeau pour les soignants. Ensuite, cette anxiété pourrait avoir elle-même des conséquences fâcheuses sur la santé des patients dont les services de santé devraient s'occuper.

Nature de l'information génétique. La nature même de l'information génétique soulève certains problèmes éthiques. Ils proviennent de l'utilisation d'analyses génétiques qui ne tiendraient pas compte de l'apport des nanotechnologies, ni de programmes d'analyses néonatales déjà obligatoires dans de nombreux pays. Ces problèmes pourraient augmenter de manière considérable au fur et à mesure que se développera l'usage de ces analyses, comme nous venons de le voir.

La nature de l'information génétique soulève deux sortes de difficultés majeures. La première est que cette information fournit de nombreuses données concernant non seulement le patient, mais encore d'autres personnes. La nature collective de l'information génétique soulève la question de la propriété. Le profil génétique d'un nouveau-né est-il sa propriété et, si oui, est-il sa propriété exclusive ? Si quelque chose m'appartient, je peux choisir si d'autres personnes peuvent l'utiliser et comment. J'ai le droit de l'utiliser comme je l'entends dans le cadre de la loi et d'en interdire l'usage à toute autre personne, même si elle en exprime le besoin urgent. Si la propriété de ce bien est partagée,

il me sera impossible d'en avoir le contrôle, même s'il est utilisé à l'encontre de mes intérêts.

Lorsque les données du profil génétique d'un nouveau-né révèlent une information significative sur celui d'un parent, ce dernier en partage-t-il la propriété ? Et n'a-t-il pas un droit de regard sur elle ? Prenons le cas d'un enfant né avec des malformations génétiques : son état résulte d'un gène dont sa mère est porteuse et dont la sœur de cette dernière pourrait aussi être porteuse. La tante de cet enfant devrait-elle être autorisée à avoir cette information qui lui permettrait de faire un choix concernant ses capacités reproductives ? Dans cet exemple précis, la mère refusa d'autoriser sa sœur à être informée. Les deux femmes n'étaient pas en bons termes et cette mère espérait que sa sœur souffrirait de la même tragédie. Que pouvait faire le généticien dans une telle situation ? Qu'en était-il de l'enfant dont on avait découvert qu'il était porteur de la mutation génétique caractérisant la maladie de Huntington ? Devait-on dire à cette mère âgée de 25 ans et dont le père était mort de cette maladie à l'âge de 48 ans, malgré son refus clairement exprimé de le savoir, qu'elle en était porteuse ? Et comment cela affecterait-il la grand-mère âgée de 45 ans qui, elle, n'avait pas exprimé ce refus ? Ce type de problème pourrait devenir beaucoup plus répandu si les analyses génétiques destinées à fournir le génome complet des nouveaux-nés devaient se généraliser. Certains conseils ou directives destinés aux praticiens devraient être imposées dès la création de ces programmes d'analyse afin de protéger les intérêts à la fois des nouveaux-nés et de leur famille, bien qu'il soit difficile de les concevoir en raison de la grande diversité des cas (IBAC, 2002).

Le second type de difficultés concerne un autre aspect des cas qui viennent d'être décrits : il s'agit de la vie privée et de la confidentialité de ces informations très personnelles. Où se trouve la ligne séparant les droits d'accès d'autres individus et institutions aux profils génétiques de nouveaux-nés provenant d'un programme concernant toute une population ? Il est clair qu'un libre accès serait au détriment des intérêts de l'enfant, en particulier lorsque, atteignant l'âge adulte, il risquerait de souffrir d'une discrimination fondée sur la crainte de développer diverses maladies ou handicaps.

Comme nous l'avons vu, l'introduction de ce genre de programmes est en partie motivée par le fait qu'ils permettraient aux gouvernements de mieux planifier leurs services de santé publique. Outre la question concernant la probabilité que les informations contenues dans le profil

génétique permettent de prévoir et planifier l'avenir avec précision, cela soulève encore une autre question : ces informations devraient-elles être utilisées dans des buts autres que ceux pour lesquels elles ont été collectées dans le public ? La manière dont sont utilisées les cartes de Guthrie offre ici un avertissement salutaire. Les échantillons de sang prélevés sur des nouveaux-nés dans le but d'analyser des malformations génétiques graves mais rares, y compris la mucoviscidose, l'hyperthyroïdie congénitale et la phénylcétonurie, sont recueillis sur des cartes de Guthrie. Ces analyses sont proposées dans le cas où une intervention précoce serait dans l'intérêt de l'enfant qui en est victime. Elles sont même obligatoires dans certains pays. Ces cartes sont conservées dans le dossier médical de l'enfant et classées sous une forme permettant de les identifier. L'on a observé que ces cartes ont parfois été utilisées à des fins différentes de celles pour lesquelles ces analyses avaient été effectuées – par exemple pour des enquêtes de police – et que, dans certains endroits, des cliniciens avaient été d'accord pour les mettre à la disposition de compagnies d'assurances, d'agences de recrutement professionnel ou d'institutions chargées de la mise en application de la loi (Elkin et Jones, 2000). L'utilisation de ces informations pour la recherche sanitaire soulève également des questions majeures concernant la vie privée (Thomas, 2004).

La disponibilité de profils génétiques complets pourrait même être une source d'informations encore plus séduisantes pour des gouvernements et d'autres institutions, qu'il s'agisse de fins bonnes ou mauvaises. Elle présenterait le risque de menacer sérieusement les libertés fondamentales. Par exemple, la possibilité d'obtenir un test de paternité destiné à la mise en application d'un jugement concernant le versement d'une pension pour un enfant deviendrait tentante. Il n'est pas difficile d'imaginer beaucoup d'autres risques plus sérieux, notamment qu'un État autoritaire en profite pour prendre certaines mesures destinées à contrôler la société. C'est pourquoi les informations provenant de programmes d'analyse de profil génétique à grande échelle doivent être soumises à un contrôle très méticuleux – si l'on admet que de tels programmes soient même autorisés.

La nanotechnologie et les soins médicaux

La nanotechnologie promet de nouvelles interventions cliniques pour les patients. La plupart ne sont maintenant que théoriques, mais d'autres sont actuellement soumises à des essais cliniques. Le rythme auquel ces

nouvelles possibilités sont proposées est remarquable. La liste ci-dessous, publiée par le *New Scientist* entre octobre 2004 et novembre 2005, en offre quelques exemples :

29 octobre 2004 Des lentilles de contact nanostructurées conçues pour relâcher, selon les besoins, des remèdes dans les yeux afin de traiter des maladies telles que le glaucome.

27 novembre 2004 Utilisation de nanoparticules d'or pour bloquer l'angiogénèse, une importante étape du développement des tumeurs, et pour éviter ainsi de détruire ces développements dans le traitement du cancer.

7 janvier 2005 Utilisation de « bombes douces » (*smart bombs*), capsules polymériques parsemées de nanoparticules d'or contenant des remèdes chimiques et attachées à des anticorps chasseurs de tumeurs qui pénétreront dans les cellules cancéreuses et exploseront sous l'effet de pulsions d'un laser athermique. Cela permettrait de tuer les cellules cancéreuses en épargnant celles qui ne sont pas atteintes.

31 janvier 2005 Des combinaisons de nanoparticules de magnétite et d'or avec des brins d'ADN permettant la détection précoce et le traitement de la maladie d'Alzheimer.

2 avril 2005 Utilisation de rayons laser à nanoéchelle pour détecter des cellules cancéreuses nichées au sein de cellules saines.

17 juin 2005 Utilisation de nanoparticules permettant le transport ciblé des remèdes vers des cellules cancéreuses en épargnant les cellules environnantes.

11 septembre 2005 Création de films de plastique « intelligents » (*smart*) destinés à recouvrir des implants, par exemple des pontages coronaires et des prothèses de hanches, ainsi qu'à relâcher progressivement des remèdes.

7 novembre 2005 Création de nouveaux organes à base de nanotubes biodégradables contenant des cellules hépatiques ou des cellules rénales pour créer un cadre vasculaire.

De plus, il a été annoncé à plusieurs reprises que la nanotechnologie permettrait de traiter des lésions vertébrales chez de récents blessés, ainsi que la production d'implants auditifs très performants. Cette liste s'allonge chaque jour.

Innovations cliniques

Que dire de tout cela ? En premier lieu, que ces découvertes sont très excitantes du point de vue des personnels sanitaires et des patients. Le rêve de pouvoir agir au niveau cellulaire semble à portée de main et les actuelles techniques chirurgicales en paraîtront bientôt primitives. Choi (2004) en parle ainsi :

Les maladies et la mauvaise santé sont largement dues à des dommages aux niveaux moléculaires et cellulaires. Vus sous cet angle, les instruments chirurgicaux d'aujourd'hui semblent énormes et grossiers. L'on dit qu'à l'échelle d'une cellule, même le plus fin scalpel semble un instrument mal aiguisé, plus apte à déchirer et blesser qu'à soigner et guérir. Les résultats de la chirurgie moderne sont uniquement dus à la remarquable habileté que les cellules ont à se regrouper, enterrer leurs morts et guérir leurs blessures.

Est-ce toutefois raisonnable de procéder à des essais cliniques à ce stade ? C'est la question essentielle à laquelle il faut répondre au sujet de ces applications et de traitements plus ambitieux promettant, à l'instar de l'utilisation des nanorobots appelés respirococytes, de pouvoir fournir de l'oxygène aux tissus de manière 236 fois plus efficace que les globules rouges naturels (Freitas, 1998).

Nous devons ici résoudre le problème soulevé par la recherche qui a permis de découvrir que les nanoparticules peuvent coaguler le sang (ETC Group, 2002) et s'accumuler dans les organismes (Brown, 2002). Établir jusqu'à quel point ces découvertes sont importantes, malgré la prouesse consistant à introduire ces particules chez des patients, est loin d'être clair. L'enthousiasme soulevé par le fait de pouvoir mieux aider des patients ne doit masquer la nécessité d'évaluer les risques que comportent de telles innovations. Le respect de l'article 4 de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* s'avère ici impératif :

Article 4 - Effets bénéfiques et effets nocifs

Dans l'application et l'avancement des connaissances scientifiques, de la pratique médicale et des technologies qui leur sont associées, les effets

bénéfiques directs et indirects pour les patients, les participants à des recherches et les autres individus concernés, devraient être maximisés et tout effet nocif susceptible d'affecter ces individus devrait être réduit au minimum.

Nous devons donc veiller à ce que l'introduction des nanotechnologies et de leurs techniques, sous l'apparence de traitements cliniques novateurs, n'échappe pas à l'examen minutieux de comités éthiques indépendants. Une récente étude a produit les directives d'un tel examen, bien qu'elle ait reconnu la difficulté conceptuelle d'obtenir des preuves concrètes de l'efficacité de ces innovations au moyen d'essais par échantillonnages prélevés en aveugle (Evans, 2002*b* ; 2002*a*).

Si l'on admet que l'objectif de chacun de ces traitements est valable, le premier souci d'un comité éthique doit être la sécurité. Il est peu vraisemblable qu'un comité se satisferait d'un rapport théorique sur la sécurité des procédures impliquant l'introduction de nanoparticules dans le corps de patients sans que de nombreux essais sur des animaux n'aient permis d'examiner les effets éventuels de ces particules sur la circulation sanguine, leur accumulation dans les organes, l'excrétion de ces particules chez les humains, etc. Par exemple, l'efficacité des revêtements déjà mentionnés devrait être vérifiée. Si les résultats démontrent que leur sécurité est acceptable, dans les limites de ce que l'on peut en savoir, ce comité devrait alors examiner à quel rythme ces techniques pourraient être progressivement introduites. Le modèle le plus utile à suivre serait probablement celui du développement de nouveaux médicaments pendant lequel des patients, ayant donné leur consentement éclairé pour des essais sécurisés, sont traités en petit nombre, puis soumis à des essais contrôlés en aveugle. Les difficultés techniques des études en aveugle peuvent être surmontées grâce à la sécurité que présente une évaluation indépendante des résultats sur les patients, puis à un audit de ces résultats. Ce n'est que lorsque l'équilibre clinique, lorsque le doute disparaîtra, que ces traitements devront être adoptés en tant que de bonne foi, même s'ils doivent subir un audit à plus long terme, car l'exposition aux nanoparticules pourrait avoir des effets délétères à long plutôt qu'à court terme.

Interventions cognitives et comportementales

Cette catégorie particulière d'interventions cliniques, encore potentielles, réclame d'être examinée séparément. En effet, elle soulève d'importantes questions éthiques concernant l'identité des patients.

Ce problème comporte deux aspects : d'une part, la question de l'amélioration comme s'opposant au traitement des êtres humains et, d'autre part, la question de l'authenticité des choix et des comportements.

Quelles sortes d'interventions ces questions soulèvent-elles ? Nous avons précédemment mentionné les discussions sur l'implantation de particules nano-informatisées dans le cerveau de patients visant à améliorer leur mémoire, à éventuellement remédier à des fonctionnements déficients du cerveau et à modifier certains comportements. Ces développements sont probablement plus théoriques qu'un grand nombre de ceux dont il va être maintenant question. Il est toutefois utile de les examiner brièvement ici, car ces applications soulèvent avec virulence certaines questions – et d'autres relativement plus courantes, déjà examinées.

Le terme de « cyborg » ou organisme cybernétique désigne des créatures constituées à la fois d'un organisme et d'une machine. Ce terme s'utilise surtout pour désigner le genre d'interaction entre une machine et un organisme humain qui résulterait de l'implantation de nano-ordinateurs dans le cerveau. L'on pense que non seulement la mémoire pourrait ainsi enregistrer des informations plus nombreuses, mais encore que cela entraînerait des modifications comportementales – par exemple, le contrôle de tendances criminelles, ou encore le contrôle d'impulsions malhonnêtes particulières.

L'amélioration des êtres humains

Si de telles interventions devenaient possibles, devraient-elles être soumises à certaines limites ? En ce qui concerne l'ingénierie génétique, cette dernière a donné lieu à de nombreux débats sur la différence entre l'intervention thérapeutique de réparation et l'amélioration. La première consiste à rectifier des anomalies afin de restaurer l'état normal d'une personne. La seconde consisterait à amplifier son potentiel normal pour qu'un humain devienne « extra-ordinaire ». Les applications des nanotechnologies concernant chacune de ces interventions amplifient encore les problèmes éthiques.

L'intervention thérapeutique a été elle-même le sujet de discussions, car elle implique de comprendre ce qui est normal, mais pourrait saper la dignité et les intérêts des êtres humains. La définition du handicap est sujette à controverse. Certains groupes d'handicapés pensent que c'est la société qui est plutôt la cause de leur handicap. En d'autres termes, le handicap est une construction sociale utilisée pour

discriminer les gens, et à leur rencontre. En ce cas, accepter un quelconque traitement, qu'il s'agisse d'une analyse génétique pré-implantaire ou d'une analyse génétique prénatale ou d'interventions semblables à celles discutées ici, serait éthiquement suspect (Wolbring, 2004). Ainsi, par exemple, mettre un terme à la vie d'un fœtus « endommagé » ou « irréparable » reflète la valeur accordée aux personnes qui, dans notre société, vivent avec ces difficultés, difficultés qui justifieraient que de tels fœtus soient éliminés.

Outre ces difficultés, une inquiétude bien particulière consiste à nous demander si nous devrions chercher à améliorer le potentiel de l'être humain, de manière à le rendre plus important que celui dont il disposerait normalement – et en étant en bonne santé. Une fois encore, il est nécessaire de clarifier nos idées concernant le normal et la normalité avant de déterminer ce que serait une amélioration. Nous devons aussi accepter que les gens ne naissent pas égaux en termes de potentiel, qu'ils soient ou non en bonne santé. Il ne s'agit pas ici d'impartialité. Mais lorsqu'il s'agit d'accroître le potentiel de personnes qui ne sont pas encore nées, l'impartialité devient un problème. Il est exact que nous produisons toutes sortes d'améliorations après la naissance, y compris grâce à l'éducation, mais elles ne sont pas disponibles pour tous en toute égalité. Certains pensent que c'est injuste et d'autres non. Nous avons cependant déjà trouvé des solutions à ce problème dans le sport où l'amélioration des performances au moyen de diverses substances, notamment les stéroïdes anabolisants, est soumise à des réglementations fondées sur l'impartialité plutôt que sur des risques inutiles pour la santé de l'athlète. La vie n'est pas un sport, mais la compétition est nécessaire pour faire son chemin dans le monde et certains sont désavantagés comparés à d'autres ayant naturellement l'esprit de compétition. Il est douteux que les moins compétitifs se trouvent en tête de ligne pour bénéficier de nano-améliorations technologiques. Quelles que soient les objections éthiques que cela peut soulever, l'on peut prédire que ces améliorations technologiques élargiront encore l'écart entre les privilégiés et les sous-privilégiés dans le monde.

Choix et comportements authentiques

Le débat éthique dans son ensemble soulève des questions encore plus sérieuses concernant des nano-interventions de ce type. Il nous interroge sur le concept de l'être humain lui-même : que craindrions-nous d'une intervention qui serait véritablement « déshumanisante » ? Il

ne fait aucun doute que le désaccord serait important. Comment le résoudre ?

Certains ont traité ce sujet sous forme de question : les cyborgs sont-ils ou non des personnes ? À la réflexion, il n'est pas aisé d'y répondre, que ce soit par « oui » ou par « non ». Les importantes discussions concernant le statut de l'embryon humain à son stade précoce, depuis la découverte des techniques FIV, nous ont donné une certaine expérience des diverses réponses possibles. La réponse la plus courante des philosophes est de proposer des critères suffisamment satisfaisants pour identifier une entité en tant que personne. Il n'existe pas de réponse unanime. Examinons, par exemple, certains critères alors proposés. Une personne doit :

- être consciente d'avoir une durée de vie (Tooley, 1972) ;
- avoir conscience d'elle-même (Singer et Wells, 1984) ;
- savoir se poser des limites (Engelhardt, 1996, p. 141) ;
- décider de ses intérêts (Gilelt, 1987) ;
- être une unité psychologiquement intégrée, capable d'actions dont elle se sent moralement responsable (Bole, 1990) ;
- être capable d'accorder de la valeur à sa propre vie (Harris, 1985, p. 7).

Le problème soulevé par cette sélection est que, d'une part, ces critères ne vont pas dans le sens de nos intuitions. En effet, nous considérons comme des personnes certains humains qui ne répondent pourtant pas à ces critères. D'autre part, selon certains des critères sélectionnés ici, les êtres humains qui se soumettraient à l'amélioration nanotechnologique auraient la capacité de répondre à ces critères de manière intellectuelle plus performante après l'intervention qu'auparavant. Certains ont suggéré qu'aucun de ces critères ne peut permettre d'identifier une personne en tant que telle (Evans, 2006).

Cela ne signifie pas pour autant qu'aucun de ces critères ne permette d'identifier ce qui est important pour justifier notre attitude morale concernant les modifications nanotechnologiques de modèles cognitifs et comportementaux. Ainsi si ce genre d'intervention modifiait d'une certaine façon le comportement – par exemple en un comportement involontaire, contrôlé par d'autres – nous considérerions que ce comportement n'est ni coupable, ni admirable. Nous jugerions néanmoins que cette interférence avec l'action volontaire est répréhensible, si ce n'est criminelle.

Toutefois, des différences existeront d'un cas à l'autre. Les comportements des patients sont déjà soumis à divers contrôles grâce à des moyens techniques qui accroissent leur liberté. Par exemple, les pacemakers facilitent les activités de ceux qui en bénéficient et ne pourraient pas vivre sans, et la pose de drains peut éviter l'hydrocéphalie et les dommages cérébraux en résultant. Dans ces cas, il n'y a pas de volonté d'ingérence. Il s'agit de cyborgs tout en étant des personnes, car ces patients correspondent à la définition de ce terme – un mélange d'organisme humain et de machine. Les remèdes modifiant le comportement, notamment la Ritaline utilisée dans le traitement des troubles de déficit de l'attention par hyperactivité, sont présumés permettre – bien qu'ils aient une action involontaire sur le comportement – aux patients de se comporter de manière authentique, intentionnelle et non impulsive, en les libérant ainsi d'eux-mêmes. Il est intéressant de remarquer que certains prennent ces médications afin de conserver leur emploi, d'accomplir certaines tâches, ou encore d'avoir la liberté de préserver leur Moi authentique sans y recourir lorsqu'ils le désirent. C'est le cas de Witty Ticky Ray (Sacks, 1985), un patient atteint du syndrome de la Tourette. Il est difficile de savoir laquelle de ses personnalités était authentique. Était-ce l'homme qui choisit de demander à Haldol de le rendre capable de mener une vie morne et ennuyeuse dans un bureau pendant la semaine, ou le batteur de jazz créatif et talentueux pendant les week-ends, pour qui ses tics n'avaient alors plus aucune importance ?

La manière dont nous réagissons envers quelqu'un apparemment généreux et attentif, ou hostile et agressif, dépend beaucoup de ce que nous savons des raisons de son comportement. Si nous savons qu'un pacemaker facilite un comportement, cela n'entraîne aucune différence dans la manière dont nous réagissons moralement à l'égard de la personne ainsi équipée. Si nous savons qu'un certain comportement va au-delà de ce que la personne pourrait contrôler ou souhaiter, alors notre point de vue devient, évidemment, très différent. Les gens peuvent, sans aucun doute, être transformés en robots à des degrés divers. Mieux nous nous rendrions compte que cela peut résulter d'interventions nanotechnologiques et plus ces interventions nous deviendraient moralement repoussantes. Néanmoins, il est difficile de discerner pourquoi nous éprouvons un rejet absolu de cette technologie, même sans tenir compte de ces considérations et étant donné que des traitements déjà disponibles et approuvés ont des conséquences cognitives et comportementales.

Lorsque le moment sera venu de prendre des décisions de principe concernant ces développements, il faudra soigneusement se référer aux articles 3.1 et 5 de la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* :

Article 3 - Dignité humaine et droits de l'homme

1. La dignité humaine, les droits de l'homme et les libertés fondamentales doivent être pleinement respectés.

Article 5 - Autonomie et responsabilité individuelle

L'autonomie des personnes pour ce qui est de prendre des décisions, tout en assumant la responsabilité et en respectant l'autonomie d'autrui, doit être respectée. Pour les personnes incapables d'exercer leur autonomie, des mesures particulières doivent être prises pour protéger leurs droits et intérêts.

CONCLUSION

La recherche sur les nanotechnologies et leurs applications dans les services de santé offre des possibilités remarquables et salutaires. Toutefois, ces résultats ne peuvent entrer en usage sans que l'on examine avec toute l'attention requise le bien-être et les droits des personnes concernées. Le passé a montré que l'absence de contrôle sur les développements technologiques peut avoir des effets délétères. Par exemple, le développement des produits pharmaceutiques a parfois ainsi compromis le bien-être de ceux qui participaient à une recherche où des directives précises et leur examen éthique se seraient avérés nécessaires. Dans ces cas, y compris dans celui de l'ingénierie génétique, la discussion éthique publique sur leurs possibles bienfaits, maux et dangers n'avait pas précédé leur développement. Les nanotechnologies nous offrent l'opportunité de penser à l'avenir, tandis qu'elles en sont encore à leur stade embryonnaire. La réflexion éthique des chercheurs, producteurs, consommateurs et gouvernements devrait assurer que des pratiques et des résultats inacceptables soient évités et que les plus désirables deviennent une réalité.

BIBLIOGRAPHIE

- Bear, G. 2005. *Blood Music*. New York : Ibooks Science Fiction Classics.
- Bole, T. J. 1990. "Zygotes, souls, substances, and persons". In : *Journal of Medicine and Philosophy*, Vol. 15, No. 6, 637-652.

- Brown, D. 2002. "Nano litterbugs? Experts see potential pollution problems". In : *Small Times*, 15 March. http://smalltimes.com/print_doc.cfm?doc_id=3266 or <http://online.sfsu.edu/~rone/Nanotech/NANO%20LITTERBUGS.htm> (accès 11 décembre 2006)
- Choi, K. 2004. "Ethical issues of nanotechnology development in the Asia-Pacific region". In : Bergstrom, P. (Ed.), *Ethics in Asia-Pacific*, p. 327-367. Bangkok : UNESCO Bangkok. <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001359/135911e.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Demello, A. J. 2003. "DNA amplification moves on". In : *Nature*, Vol. 422, 28-29.
- Department of Health, UK. 2003. *Our Inheritance, Our Future: Realising the Potential of Genetics in the NHS*. Genetics White Paper, Cm 5791-II. London : Department of Health. <http://www.dh.gov.uk/assetRoot/04/01/92/39/04019239.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Drexler, E. 1986. *Engines of creation: The Coming Era of Nanotechnology*. New York : Anchor Books/Doubleday.
- Dunford, R. ; Salinaro, A. ; Cai, L. ; Serpone, N. ; Horikoshi, S. ; Hidaka, H. ; Knowland, J. 1997. "Chemical oxidation and DNA damage catalysed by inorganic sunscreen ingredients". In : *FEBS Letters*, Vol. 418, Nos. 1-2, 87-90.
- Elkin J. ; Jones, D. G. 2000. "Guthrie cards: Legal and ethical uses". In : *New Zealand Bioethics Journal*, Vol. 1, No. 2, 22-26.
- Engelhardt, H. 1996. *The Foundations of Bioethics*. 2d ed. Oxford : Oxford University Press.
- ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration). 2002. *No small matter! Nanotech particles penetrate living cells and accumulate in animal organs*.
- ETC Group, <http://online.sfsu.edu/~Erone/Nanotech/nosmallmatter.html> (accès 11 décembre 2006)
- Evans, D. 1993. "Limits to care". In : Evans, D. ; Szawarski, Z. (Eds.), *Solidarity, Justice and Health Care Priorities*, 28-41. Linköping, Sweden : University of Linköping Press.
- . 1996. "The limits of health care". In : Greaves, D. ; Upton, H. (Eds.), *Philosophical Problems in Health Care*, 159-173. Aldershot, England : Avebury.

- . 1999. “Ethics and genetics”. In : *New Zealand Medical Journal*, Vol. 112, 109-112.
- . 2002a. “**Ethical issues in research, Part I: Research by stealth**”. In : *Science’s Next Wave*.
- [http://sciencecareers.sciencemag.org/career_development/previous_issues/articles/1750/ethical_issues_in_research_part_i_research_by_stealth/\(parent\)](http://sciencecareers.sciencemag.org/career_development/previous_issues/articles/1750/ethical_issues_in_research_part_i_research_by_stealth/(parent)) (accès 20 décembre 2006)
- . 2002b. “**Ethical review of innovative treatment**”. In : *HealthCare Ethics Committee Forum*, Vol. 14, No. 1, 53-63.
- . 2006. “Qualifying as a person”. In : Holm, S. ; Häyry, M. ; Takala, T. (Éds.), *Life of Value*. Amsterdam/New York : Rodopi (2007).
- Foresight Nanotech Institute. 2006. *Supplying Clean Water Globally (Foresight Nanotech Update, No. 56, Été)*.
- <http://foresight.org/publications/FNupdate56.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Freitas, A. R. 1998. Nanomedicine FAQ.
- <http://www.foresight.org/Nanomedicine/NanoMedFAQ.html> (accès 12 octobre 2006)
- Gillet, G. R. 1987. “Reply to J. M. Stanley: Fiddling and Clarity”. In : *Journal of Medical Ethics*, Vol. 13, No. 1, 23-25.
- Harris, J. 1985. *The Value of Life*. London : Routledge.
- Hoet, P. H. M. ; Nemmar, A. ; Nemery, B. 2004. “Health impact of nanomaterials?”. In : *Nature Biotechnology*, Vol. 22, No. 19, 19.
- Human Genetics Commission (HGC). 2005. *Profiling the Newborn: A Prospective Gene Technology?* March. London : HGC.
- HYPERLINK «<http://www.hgc.gov.uk/UploadDocs/Contents/Documents/Final%20Draft%20of%20Profiling%20Newborn%20Report%2003%2005.pdf>» <http://www.hgc.gov.uk/UploadDocs/Contents/Documents/Final%20Draft%20of%20Profiling%20Newborn%20Report%2003%2005.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Independent Biotechnology Advisory Council (IBAC). 2002. *Genetic Testing: An Introduction to the Technology that is Changing Our Lives*. Wellington : New Zealand.
- Kerruish, N. J. ; Robinson, S. P. 2005. “Newborn screening: New developments, new dilemmas”. In : *Journal of Medical Ethics*, Vol. 31, 393-398.
- Mertz, J. L. 2001. “Technological and educational implication of nanotechnology infrastructure and educational needs”. In :

- Roco, M. C. ; Bainbridge, W. S. (Eds.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. NSET Workshop Report, 148-155. Washington, DC : National Science Foundation.
- Obeid, P. J. ; Christopoulos, T. K. ; Crabtree, H. J. ; Backhouse, C. J. 2003. "Microfabricated device for DNA and RNA amplification by continuous-flow polymerase chain reaction and reverse transcription-polymerase chain reaction with cycle number selection". In : *Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 2, 288-295.
- Oberdörster, E. 2004. "Manufactured nanomaterials (Fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass". In : *Environmental Health Perspectives*, Vol. 112, No. 10, 1058-1062.
- Oberdörster, G. ; Sharp, Z. ; Atudorei, V. ; Elder, A. ; Gelein, R. ; Kreyling, W. ; Cox, C. 2004. "Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain". In : *Inhalation Toxicology*, Vol. 16, Nos. 6-7, 437-445.
- Phoenix, C. ; Drexler E. 2004. "Safe exponential manufacturing". In : *Nanotechnology*, Vol. 15, 869-872.
- The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. 29 July. London : The Royal Society & the Royal Academy of Engineering.
<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (accès 22 décembre 2006)
- Sacks, O. 1985. *The Man Who Mistook His Wife for a Hat*. New York : Touchstone.
- Scientific Committee on Cosmetic Products and Non-Food Products (SCCNFP). 2003. Opinion concerning zinc oxide (COLIPA No. S 76). SCCNFP/0649/03. Brussels : European Commission, Health & Consumer Protection DG.
http://www.europa.eu.int/comm/health/ph_risk/committees/sccp/documents/out222_en.pdf (accès 22 décembre 2006)
- Sheremeta, L. 2004. "Nanotechnology and the ethical conduct of research involving human subjects". In : *Health Law Review*, Vol. 12, No. 3, 47-56.
- Singer, P. A. ; Salamanca-Buentello, F. ; Daar, A. 2005. "Harnessing nanotechnology to improve global equity". In : *Issues in Science*

- and Technology*, 9 July, 57-64. <http://www.issues.org/21.4/singer.html> (accès 22 décembre 2006)
- Singer, P. ; Wells, D. 1984. *Making Babies: The New Science and Ethics of Conception*. Oxford : Oxford University Press.
- Thomas, C. 2004. "Guthrie test samples: Is the problem solved?". In : *New Zealand Bioethics Journal*, Vol. 5, No. 2, 25-33.
- Tooley, M. 1972. "Abortion and infanticide". In : *Philosophy and Public Affairs*, Vol. 2, No. 1, 37-65.
- UNESCO. 2005. *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme*. Paris : UNESCO.
- Wolbring, G. 2004. "Solutions follow perceptions: NBIC and the concept of health, medicine, disability and disease". In : *Health Law Review*, Vol. 12, No. 3, 41-46.

Partie III

Enjeux politiques

Chapitre 6

LA NANOTECHNOLOGIE ET LE MONDE EN DÉVELOPPEMENT

Erin B. Court, Fabio Salamanca-Buentello, Peter A. Singer
et Abdallah S. Daar

La disparité entre les niveaux de vie des pays développés et des pays en développement, ainsi que les iniquités socioéconomiques y existant, constituent les problèmes éthiques les plus cruciaux de notre époque (Benatar *et al.*, 2005). Bien que le droit à une vie saine et épanouie soit éclipsé par la faim, la pauvreté et la maladie dans les pays en développement, il reste le même pour leurs populations que pour celles des pays industrialisés. Partout dans le monde, les iniquités sont exacerbées par le fait que les sciences et technologies (S&T), ainsi que la R&D, sont trop concentrés dans les pays développés dont ils visent les priorités. Cette situation s'applique également aux nanotechnologies. Cette différence ne peut disparaître que si les décideurs des pays en développement ont la volonté de faire de leur société une société du savoir capable de répondre à ses propres besoins économiques et sociaux (UNESCO, 2005). L'UNESCO peut jouer un rôle essentiel pour que la nanotechnologie se développe tout en ayant des effets positifs dans les pays les moins industrialisés et contribue ainsi à en améliorer la qualité de la vie.

Chacun sait aujourd'hui que les S&T sont des composants essentiels du développement. Le *Rapport sur le développement humain* publié en 2001 par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD, 2001) souligne que les effets des S&T ont réduit de manière importante les taux de mortalité et amélioré l'espérance de vie entre 1960 et 1990. Le groupe d'étude sur les sciences, les technologies et l'innovation travaillant au projet Objectifs du Millénaire des Nations

Unies (UNMP, 2005) considère que l'innovation est capitale pour instaurer un développement durable.

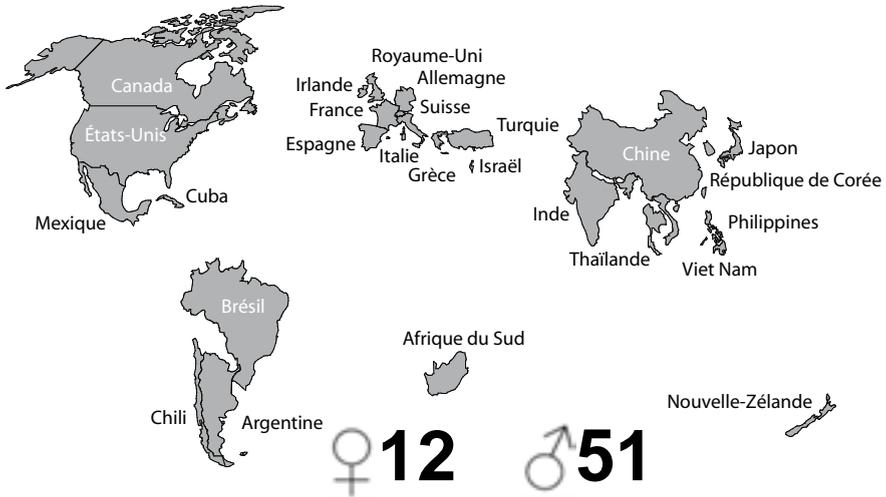
APPLICATIONS DE LA NANOTECHNOLOGIE LES PLUS PERTINENTES POUR LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Notre groupe d'étude s'est réuni au Centre McLaughlin-Rotman pour le programme en sciences de la vie et santé mondiale, auparavant nommé « programme canadien de recherche sur le génome et la santé dans le monde » (<http://www.geneticethics.net>) en vue de faire une étude approfondie sur la façon dont des technologies émergentes telles que la biotechnologie et la nanotechnologie pourraient profiter aux 5 milliards de personnes vivant dans le monde en développement. Comme on a pu le constater au sujet d'autres technologies, les progrès de la nanotechnologie sont en général orientés à l'avantage des pays industrialisés. Notre groupe a cependant identifié certaines applications de la nanotechnologie qui pourraient résoudre bien des problèmes mondiaux, et nombre de pays en développement sont déjà engagés dans la recherche sur des nanotechnologies qui correspondent à leurs besoins.

En 2004, nous avons conduit une étude visant à identifier les applications des nanotechnologies dites prioritaires parce qu'elles s'avèrent des plus utiles pour les pays en développement pendant la décennie 2003-2013 (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005). Nous avons utilisé la méthode Delphi modifiée, une méthode consistant à envoyer de manière systématique des séries successives de questionnaires suivies d'un contrôle effectué en retour par les participants. Cette méthode permet de collecter et diffuser les connaissances d'un groupe d'experts, puis de constituer un groupe dont le consensus sur des questions d'évaluation spécifiques peut être fiable. Ce type d'exercice prospectif à l'échelle mondiale permet de mettre en place une coopération internationale entre différents experts en S&T qui peut ensuite être utilisée pour résoudre les problèmes des besoins locaux des pays en développement.

Pour notre étude, nous avons donc sélectionné un panel de 63 experts grâce à des contacts déjà établis lors de notre étude précédente consacrée aux activités nanotechnologiques des pays en développement (Court *et al.*, 2004). Nous nous sommes efforcés de respecter un équilibre entre les genres, les spécialités nanotechnologiques et la distribution géographique. Parmi ces experts, 38 (60 %) venaient de

Figure 6.1 Distribution géographique des 63 experts de 26 pays ayant participé à l'étude selon la méthode Delphi concernant les 10 nanotechnologies les plus importantes ayant le potentiel de pouvoir bénéficier aux pays en développement



pays en développement et 25 (40 %) de pays développés ; 51 étaient des hommes (81 %) et 12 (19 %) des femmes.

Nous avons formulé une définition de la nanotechnologie à partir de plusieurs sources afin d'assurer le caractère international de notre étude. Cette définition a été validée par des experts en nanotechnologie, ainsi qu'en science politique et en développement durable. La voici :

La nanotechnologie consiste en l'étude, la conception, la synthèse, la manipulation et l'application de matériaux, machines et appareillages fonctionnels grâce au contrôle de la matière à l'échelle du nanomètre (de 1 à 100 nanomètres, un nanomètre égalant 1×10^{-9} d'un mètre), c'est-à-dire aux niveaux atomiques et moléculaires, ainsi qu'en l'exploitation de nouveaux phénomènes et propriétés de la matière qui se manifestent habituellement à cette échelle.

Au cours de cette étude fondée sur la méthode Delphi, nous avons posé la question ouverte suivante : « Quelles sont, à votre avis, les nanotechnologies qui, au cours des dix prochaines années, pourraient le mieux bénéficier aux pays en développement dans les secteurs de l'eau, l'agriculture, la nutrition, la santé et l'environnement ? » Ces six secteurs ont été identifiés lors du Sommet mondial sur le développement durable, tenu en 2002 à Johannesburg (ONU, 2002). Nous avons

demandé aux experts de répondre en utilisant des facteurs identifiés lors d'une précédente étude où nous avons identifié 10 nanotechnologies de pointe visant à améliorer la santé dans les pays en développement (Daar *et al.*, 2002). Ces facteurs sont les suivants : impact, charge, adéquation, faisabilité et avantages indirects. Trois tours de questionnaires de type Delphi furent envoyés par courriels, fax et téléphone. Lors du premier tour, les experts répondirent en proposant plusieurs exemples. Nous avons analysé et classé leurs réponses selon des thèmes qui leur étaient communs, puis nous avons élaboré une liste comprenant 20 applications nanotechnologiques précises. À notre demande, deux experts indépendants de ce panel ont alors analysé la manière dont cette liste avait été élaborée, ainsi que son contenu, afin d'en vérifier la validité. Au deuxième tour, les experts ont sélectionné 10 de ces 20 applications en ajoutant les raisons de leur choix. Afin de procéder à l'analyse de ces données, nous avons alors conçu un système de notation pour chaque application, et cela en nous basant sur les raisons données par les experts. Nous avons ensuite révisé la première liste pour en établir une seconde, cette fois en fonction des 13 premières applications sélectionnées, et non des dix premières. Cela permettait d'offrir un choix plus important et plus précis pour le troisième tour. La note la plus élevée d'une application pouvait donc être 819 (63 x 13). Ce dernier tour de questionnaire visait à renforcer le consensus pour obtenir une nouvelle liste des 10 premiers choix établis à partir des 13 obtenus dans le deuxième tour où nous avons rassemblé les exemples concrets fournis pour chaque application par les experts. Les résultats ainsi obtenus révélèrent un consensus élevé pour les quatre applications considérées comme les plus importantes des quatre rangées en tête de liste par ces experts, la majorité d'entre eux en ayant cité au moins trois (*tableau 6.1*).

Afin d'affiner encore notre évaluation des effets de la nanotechnologie sur le développement durable, nous avons établi une corrélation entre les 10 applications en tête de cette liste avec les Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD). Les OMD comprennent huit critères destinés à mesurer le progrès du développement humain et en indiquer la viabilité sociale et économique (*figure 6.2*). En 2000, les 189 États membres des Nations Unies se sont engagés à atteindre ces objectifs en 2015. Les applications des nanotechnologies classées dans notre étude parmi les 10 premières peuvent jouer un rôle considérable pour atteindre ces objectifs (*figure 6.3*). Les exemples fournis par nos

Tableau 6.1 Classement des 10 meilleures nanotechnologies pouvant bénéficier aux pays en développement

Place (score)	Applications de la nanotechnologie	Exemples	Corrélation avec les OMD
1	Stockage, production et conservation d'énergie	Nouveaux systèmes de stockage à base de nanotubes de carbone et autres matériaux ultralégers. Cellules photovoltaïques et équipements organiques émetteurs de lumière produits à partir des points quantiques. Nanotubes de carbone dans les revêtements de films composites pour cellules solaires. Nanocatalyseurs pour produire de l'hydrogène. Membranes biomimétiques en protéines-polymères hybrides.	VII
2	Amélioration de la productivité agricole	Zéolites nanoporeuses pour un dosage efficace et progressif de l'eau et des fertilisants pour les plantes, ainsi que celui des nutriments et remèdes pour le bétail.	I, IV, V, VII
3	Traitement et assainissement de l'eau	Nanomembranes pour purifier, désaliner l'eau et en filtrer les toxines. Nanodétecteurs pour détecter des agents contaminants et pathogènes dans les sols. Zéolites poreux, polymères nanoporeux et argiles attapulgites pour purifier l'eau. Nanoparticules magnétiques pour traiter et assainir l'eau. Nanoparticules de TiO ₂ pour la dégradation catalytique des polluants dans l'eau.	I, IV, V, VII
4	Diagnostics et examens médicaux	Systèmes à échelle du nanolitre (lab-on-a-chip). Détecteurs-puces de protéines à base de nanotubes de carbone. Points quantiques pour diagnostiquer certaines maladies. Nanoparticules magnétiques utilisées comme nanodétecteurs. Conjugaison d'anticorps et dendrimères pour le diagnostic du VIH-1 et du cancer. Nanofils et nanodétecteurs en nanoceinture pour diagnostiquer certaines maladies. Nanoparticules pour améliorer les images médicales.	IV, V, VI
5	Transport interne de remèdes	Nanocapsules, liposomes, dendrimères, buckyballs, nanobioaimants et argiles attapulgites pour des systèmes de fourniture interne et progressive de remèdes.	IV, V, VI
6	Préparation et conservation des aliments	Nanocomposites pour revêtements en film plastique pour l'emballage des aliments. Nanoémulsions antimicrobiennes pour désinfecter les équipements de préparation et de conditionnement des aliments, et désinfecter les aliments. Biodétecteurs nanotechnologiques basés sur les antigènes pour identifier la contamination pathogène.	I, IV, V
7	Dépollution de l'air	Particules photocatalytiques à base de nanoparticules de TiO ₂ dans des systèmes autonettoyants pour purifier l'air des polluants.	IV, VII
8	Construction	Structures nanomoléculaires pour l'imperméabilité de l'asphalte et du béton. Nanomatériaux thermorésistants pour bloquer les UV et les IR. Nanomatériaux pour surfaces, revêtements, colles et ciments destinés à la construction de maisons durables et peu onéreuses ainsi protégées de la chaleur et de la lumière. Surfaces autonettoyantes (ex. : fenêtres, miroirs, toilettes) à revêtements bioactifs.	VII
9	Soins médicaux	Nanotubes et nanoparticules pour détecter le glucose, le CO ₂ et le cholestérol et pour le monitoring in situ des homéostases.	IV, V, VI
10	Détection et contrôle des vecteurs et parasites	Nanodétecteurs de parasites. Nanoparticules pour de nouveaux pesticides, insecticides et répulsifs contre les insectes.	IV, V, VI

Source : Salamanca-Buentello et al., 2005

Figure 6.2 Les Objectifs du Millénaire pour le développement

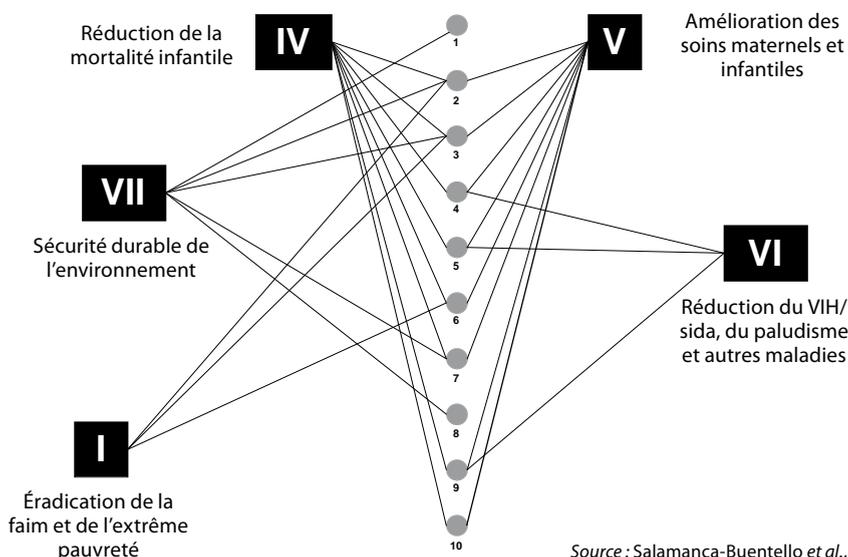


Les Objectifs du Millénaire pour le développement

- Réduire l'extrême pauvreté et la faim
- Assurer l'éducation primaire pour tous
- Promouvoir l'égalité et l'autonomisation des femmes
- Réduire la mortalité infantile
- Améliorer la santé maternelle
- Combattre le VIH/sida, le paludisme et d'autres maladies
- Assurer un environnement durable
- Mettre en place un partenariat mondial pour le développement

Source : www.un.org/french/millenniumgoals/index.shtml

Figure 6.3 Corrélation entre les 10 nanotechnologies dont le potentiel est le plus élevé pour aider les pays en développement à atteindre les ODM



experts sont tout particulièrement utiles aux quatre secteurs-clés du développement durable (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005 ; Court *et al.*, 2005).

Développement de sources d'énergie renouvelable

Un tiers de la population mondiale dépend pour l'essentiel de combustibles traditionnels, polluants et non renouvelables. La nanotechnologie pourrait fournir aux pays en développement les moyens de maîtriser leurs ressources renouvelables et leur éviter ainsi des crises d'énergie récurrentes, ou encore de dépendre d'énergies fossiles, de dégrader leur environnement et d'épuiser leurs ressources en pétrole et en charbon. Les cellules solaires et les nouveaux systèmes de stockage de l'hydrogène utilisant des nanomatériaux promettent d'offrir des énergies propres. Les points quantiques et les films ultrafins des polymères semi-conducteurs pourraient réduire de manière significative le coût des cellules solaires classiques. La recherche sur les propriétés de photosensibilisation d'appareils photovoltaïques nanoporeux est actuellement conduite dans certains pays en développement. L'électricité pourrait aussi être produite à moindre coût grâce à la création de systèmes artificiels incorporant des protéines possédant des propriétés de transduction de l'énergie dans un moteur. Théoriquement, toutes ces applications sont robustes, de maintenance aisée et fiable.

Promouvoir la santé

Dans les pays en développement, près de 3 millions de personnes meurent chaque année du VIH/sida. Les décès dus à la tuberculose chez les adultes y représentent plus d'un quart de toutes les maladies qui pourraient être prévenues et presque 1 million d'enfants meurent chaque année aussi du paludisme. Les nanotechnologies permettant de produire des moyens de diagnostic, des remèdes et des vaccins sont particulièrement prometteuses pour ces pays. Des moyens de diagnostic peu coûteux, d'emploi facile et multifonctionnels pourraient être utilisés lors de campagnes de diagnostic pratiquées dans des dispensaires locaux. Les chercheurs développent ainsi actuellement une nouvelle méthode de diagnostic de la tuberculose. Les analyseurs microfluides (*lab-on-a-chip*), les détecteurs-puces de protéines à base de nanotubes de carbone, les nanoparticules magnétiques et les points quantiques offrent d'importants avantages sur les méthodes conventionnelles de diagnostic. La nanotechnologie pourrait aussi être utilisée pour admi-

nistrer des remèdes de manière progressive et ciblée, ce qui serait très utile aux pays ne possédant pas les équipements nécessaires pour stocker les médicaments ou de réseaux de distribution adéquats. La nanotechnologie pourrait aussi réduire le coût de leur transport en améliorant l'efficacité, la thermostabilité et la résistance aux variations d'humidité de plusieurs médicaments qui existent déjà.

Réduire la faim

Une partie importante de la population des pays en développement vit dans des zones rurales et ne dispose pas de sources suffisantes d'aliments nutritifs. La malnutrition contribue à plus de la moitié des morts d'enfants de moins de cinq ans dans les pays les moins industrialisés. Plusieurs applications de la nanotechnologie à l'agriculture pourraient réduire la malnutrition – et donc la mortalité infantile – en améliorant la fertilité des sols et leur productivité. Certains matériaux poreux, notamment les zéolites utilisés pour former des suspensions stables et bien contrôlées qui absorbent ou rejettent certaines substances, pourraient être employés pour doser de manière efficace et progressive les fertilisants dans les champs, ainsi que les nutriments et remèdes pour le bétail. Des nanodétecteurs pourraient permettre, en étant appliqués sur la peau du bétail ou diffusés sur des champs, d'y détecter la présence de pathogènes et d'en contrôler ainsi la santé. De plus, les méthodes de conservation et de stockage des aliments fondées sur la nanotechnologie permettraient de distribuer les produits alimentaires de manière plus ample et efficace vers les régions éloignées des pays moins industrialisés.

Améliorer l'approvisionnement en eau saine et l'assainissement

Un sixième de la population mondiale ne dispose pas des moyens les plus essentiels pour avoir accès à de l'eau saine. En Afrique, en Asie et en Amérique latine, plus d'un tiers des populations rurales ne disposent pas d'eau saine. Plus de deux millions d'enfants meurent chaque année de maladies hydriques telles que la diarrhée, le choléra, la typhoïde et la schistosomiase, à cause du manque d'eau saine et d'un assainissement inadéquat. L'arsenic, le fluor et les nitrates menacent les approvisionnements en eau potable dans de nombreuses régions. Des systèmes peu coûteux, faciles à transporter et à nettoyer – comme les nanomembranes et les nanoargiles – peuvent pourtant purifier, assainir et désaliner l'eau

plus efficacement que les moyens classiques de filtrer les bactéries et virus. Des systèmes nano-électrocatalytiques pourraient être employés pour décomposer les polluants organiques et purifier les sels et métaux lourds se trouvant dans des liquides, ce qui permettrait d'utiliser à des fins domestiques et agricoles de l'eau qui serait autrement lourdement contaminée et salée. Les particules nanomagnétiques et les matériaux nanoporeux – comme les zéolites et l'attapulгите – peuvent également être utilisés pour purifier l'eau de métaux lourds toxiques, de polluants organiques et des bactéries. Certaines des substances contaminantes ainsi récupérées pourraient être aisément recyclées.

LA RECHERCHE NANOTECHNOLOGIQUE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Les pays en développement ne doivent pas rester passifs, observant de loin les pays industrialisés profiter de la nanotechnologie dont seuls de maigres bénéfiques parviennent non sans mal aux plus nécessiteux. Leurs besoins requièrent une politique centrée sur l'*innovation* technologique et non sur le simple *transfert*. Alors que la revue économique *Forbes Magazine* publie un numéro spécial annuel consacré aux « dix nano-produits de pointe » – chauffe-pieds, balles de golf et soins cosmétiques personnalisés (Wolfe, 2005) –, une nouvelle stratégie semble nécessaire pour permettre aux pays les moins industrialisés de développer leurs propres moyens de produire des innovations nanotechnologiques répondant à leurs priorités locales. En 2006, Mohammed Hassan, le président de l'Académie des sciences pour le monde en développement, a publié un article soulignant qu'une certaine tendance à investir en S&T se dessine actuellement dans les pays en développement et mettant en lumière les investisseurs concernés (Hassan, 2005). Notre récente étude des nanotechnologies dans les pays en développement (Court *et al.*, 2004) a révélé qu'un grand nombre d'entre eux se sont lancées dans un nombre surprenant d'activités de R&D dans ce domaine (*tableau 6.2*). Ces activités consistent en diverses initiatives soutenues par les gouvernements nationaux dont les politiques visent à encourager les innovations technologiques. Elles sont également soutenues par des industries locales en partenariat avec des scientifiques et des chercheurs en vue de répondre aux besoins locaux qui, logiquement, constituent un marché. Nous allons à présent passer en revue l'information collectée au cours de notre étude (Singer *et al.*, 2005 ; Singer *et al.*, 2006) portant sur plusieurs pays.

Chine

La Chine a établi un plan national de la nanoscience et de la nanotechnologie très important, un Comité national directeur pour les nanosciences et les nanotechnologies, ainsi qu'un Comité national pour la coordination des nanosciences. Onze instituts de l'Académie des sciences travaillent sur des projets de recherche d'importance majeure en nanotechnologie, en partie financés par le programme chinois pour les connaissances et l'innovation. Le ministère de la Science et de la Technologie soutient activement plusieurs initiatives en nanosciences et nanotechnologies. Le Centre de technologie du nanomètre à Beijing

Tableau 6.2 Les divers niveaux des activités nanotechnologiques dans quelques pays sélectionnés

Catégorie	Pays	Progrès des activités en nanotechnologie	Exemples
Champions	Chine Corée du Sud Inde	<ul style="list-style-type: none"> - Programme national de nanotechnologie financé par le gouvernement. - Brevets en relation avec la nanotechnologie. - Produits commercialisés sur le marché ou en cours de développement. 	<p>Chine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centre national pour la nanoscience et la nanotechnologie. - Essais cliniques sur de l'os par scaffolding (nanoconstruction). <p>Corée du Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Programme de développement de la nanotechnologie. - Premier nanotube de carbone pour écrans. <p>Inde :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Initiative de la science et de la technologie des nanomatériaux. - Commercialisation de systèmes de transport ciblé de médicaments.
Peloton	Thaïlande Philippines Afrique du Sud Brésil Chili	<ul style="list-style-type: none"> - Développement d'un programme national gouvernemental de nanotechnologie. - Une forme de soutien gouvernemental (ex. : bourses de recherche). - Implication limitée du monde industriel. - Nombreuses institutions consacrées à la recherche. 	<p>Thaïlande :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centre de nanoscience et de nanotechnologie, université Mahidol. <p>Philippines :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Université des Philippines / Projet optoélectronique d'Intel Technology Philippines. <p>Afrique du Sud :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Initiative de l'Afrique du Sud pour les nanotechnologies (SANI). <p>Brésil :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Institut des nanosciences, université fédérale de Minas Gerais. <p>Chili :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Groupe de nanotechnologie, université pontificale catholique du Chili.
Nouveaux venus	Argentine Mexique	<ul style="list-style-type: none"> - Financement gouvernemental pas encore établi. - Groupes de recherche financés par plusieurs institutions de R&D. 	<p>Argentine :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Groupe de recherche en nanosciences, Centre atomique Bariloche et Institut Balseiro. <p>Mexico :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Département des matériaux avancés, Institut Potosino de recherche scientifique et technologique.

Source : Salamanca-Buentello *et al.*, 2005.

fait partie du plan qu'a la Chine de créer un centre et des infrastructures nationales concernant la nanotechnologie. Ce centre recrutera des chercheurs, gèrera la protection des droits de propriété intellectuelle et lancera une coopération internationale en nanotechnologie. À l'université de Tsinghua, un groupe de chercheurs a inventé un os artificiel – le « nano-os » – qui a déjà permis de traiter 18 patients atteints d'une maladie osseuse ; selon ces chercheurs, cet implant artificiel est absorbé par le corps du porteur et remplacé par son propre tissu osseux. Le premier complexe industriel consacré à la technologie du nanomètre en Chine se trouve dans la région de Tianjin, actuellement en plein essor économique. L'un des producteurs d'appareils ménagers du pays, Haier, a déjà intégré des matériaux et moyens dérivés de la nanotechnologie à des réfrigérateurs, télévisions et ordinateurs. Les chercheurs des universités et de l'industrie travaillent maintenant ensemble pour produire des nanorevêtements de textiles qui rendent la soie, la laine et le coton, imperméables à l'eau et aux graisses, leur évitent de rétrécir et évitent que la soie se décolore. L'entreprise Nanotech Port, à Shenzhen, est le plus grand fabricant de nanotubes de carbone mono- et multifeuillets en Asie. L'entreprise Shenzheng Chengying High-Tech produit une poudre composite nanostructurée résistant aux ultraviolets, une poudre composite nanostructurée photocatalysatrice et du dioxyde de titane nanostructuré de pureté très élevée. Ces deux derniers matériaux sont déjà utilisés pour catalyser la destruction de contaminants à l'aide de la lumière solaire.

Inde

Les efforts de l'Inde en nanotechnologie couvrent des domaines très variés, dont des systèmes microélectromécaniques (MEMS), la synthèse et la caractérisation des nanostructures, des puces d'ADN, le calcul quantique électronique, des nanotubes de carbone, des nanocomposites et diverses applications biomédicales. Le gouvernement indien a lancé, depuis son Département des sciences et des technologies, un programme national de nanotechnologie financé à hauteur de \$E.-U. 10 millions pour trois ans. L'Inde a également créé une « initiative pour les sciences et technologies de nanomatériaux » et un programme national pour les matériaux intelligents (*smart materials*) financé à hauteur de \$E.-U. 15 millions pendant cinq ans. Ce programme, centré sur la recherche de matériaux très sensibles aux stimuli environnementaux, est cofinancé par cinq agences gouvernementales et comprend

cinq centres de recherche. Son ministère de la Défense développe divers programmes de recherche sur des nanomatériaux magnétiques, des films ultrafins, des détecteurs magnétiques, des nanomatériaux semi-conducteurs et divers autres nanomatériaux. L'Inde s'est aussi associée à l'Union européenne (UE) pour lancer une initiative conjointe en nanotechnologies. Plusieurs institutions universitaires se consacrent à la recherche et au développement des nanotechnologies, notamment l'Institut des structures et systèmes des matériaux intelligents (Institute of Smart Materials Structures and Systems) dépendant de l'Institut indien des sciences (Indian Institute of Science), l'Institut indien des technologies (Indian Institute of Technology), l'Académie Shanmugha des arts, des sciences, des technologies et de la recherche (Shanmugha Arts, Science, Technology and Research Academy), l'Institut Saha de physique nucléaire (Saha Institute of Nuclear Physics) et les universités de Delhi, Pune et Hyderabad. Le Conseil de la recherche scientifique et technique (Council for Scientific and Industrial Research), organe le plus important de R&D en Inde, possède de nombreux brevets relatifs aux nanotechnologies, y compris des moyens novateurs de transport ciblé de remèdes, la production de nanosubstances chimiques et la synthèse à température élevée de carbide de titane. En 2003, l'université de Delhi a obtenu un brevet américain pour un nanosystème de transport ciblé de remèdes. Dans le secteur industriel, l'entreprise Nano Biotech Ltd conduit une recherche nanotechnologique sur plusieurs méthodes et moyens diagnostiques et thérapeutiques. Cette entreprise a inventé des tests immunodiagnostiques pour le VIH/sida, l'hépatite B et la syphilis, ainsi qu'un kit de diagnostic de grossesse, et elle cherche à produire de nouveaux systèmes de transport ciblé de remèdes pour le VIH/sida, diverses maladies infectieuses et la santé génésique. La Fondation Dabur (Dabur Research Foundation) travaille au développement de systèmes de transport ciblé de remèdes anticancéreux. De même, l'entreprise Panacea Biotec a réalisé divers progrès dans de nouveaux systèmes de contrôle et relâchement de remèdes comprenant certaines nanoparticules destinées à traiter des maladies oculaires, ainsi que des nanoparticules muco-adhésives et le transport ciblé de remèdes. Un laboratoire de recherche financé par des fonds privés, le CranesSci MEMS Lab, installé dans le Département d'ingénierie mécanique de l'Institut indien des sciences (Indian Institute of Science), est la première institution travaillant sur les MEMS financée en Inde par des fonds privés. Ce laboratoire conduit une recherche orientée vers la création de

nouveaux produits pour laquelle elle utilise les bénéfices provenant de ses droits de propriété intellectuelle sur des MEMS et leurs dérivés et en investit une partie en priorité dans l'éducation et autres activités de bienfaisance. En collaboration avec des collègues américains, les chercheurs de l'université hindoue de Banaras ont inventé une méthode de production à grande échelle de filtres en nanotubes de carbone destinés à assainir l'eau. Une ONG indienne, l'Institut Nimbkar de recherche agricole (Nimbkar Agricultural Research Institute, NARI) se consacre à des programmes en R&D très novateurs pour améliorer la qualité de l'eau chez les populations rurales pauvres de l'Inde. Elle travaille actuellement sur des nanomachines capables de modifier des fuels dérivés de la biomasse pour produire des moyens d'éclairage efficaces et transportables destinés aux communautés rurales. Cette ONG prévoit que, lorsque cette technologie sera utilisable, « elle aura trouvé les moyens d'en réduire le coût et les mécanismes de financement pour les rendre disponibles dans les communautés rurales pauvres. » (NARI, 2005)

Brésil

Le gouvernement du Brésil considère la nanotechnologie comme un domaine stratégique. L'Initiative nationale brésilienne en nanotechnologie a été lancée en 2001. Elle réunit des équipes de recherche de haut niveau qui travaillent dans plusieurs institutions universitaires et centres nationaux de recherche. Quatre réseaux de recherche ont été créés grâce à des fonds provenant du ministère de la Science et de la Technologie par le canal du Conseil national pour le développement scientifique et technologique. Ce programme national a également créé deux instituts virtuels travaillant dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. En 2004, le budget de recherche dans ce domaine s'élevait à \$E.-U. 7 millions environ et le budget prévu pour 2004-2007 devrait atteindre quelque \$E.-U. 25 millions. Au Brésil, plus de 400 chercheurs se consacrent à la nanotechnologie. Ces équipes développent des nanoaimants pour purifier l'eau contaminée par d'importantes fuites de pétrole ; des micro- et nanoparticules biodégradables destinées au transport ciblé de remèdes vers certains tissus et cellules ; des techniques pour produire des micro- et nanotubes de diamant possédant diverses porosités et différentes sortes de pointes utilisées dans les « canons » moléculaires, des implants, des prothèses et des appareils luminescents ; des nanotubes pour biodétecteurs et d'autres nanocomposants électroniques et mécaniques de nanomachines ; des

applications de maillage triangulaire 3D pour la bioingénierie des tissus ; des systèmes électroniques de contrôle à distance pour des robots destinés à réduire au minimum les effets invasifs de la chirurgie ; des détecteurs myoélectriques (pour déterminer le degré des contractions musculaires), des détecteurs en fibres optiques (pour vérifier les angles dans les mouvements), des détecteurs d'énergie et de température ; des nanoaimants pour le transport ciblé de remèdes anticancéreux et contre le VIH/sida ; ainsi que des nanoparticules magnétiques compatibles avec le sang humain et dont les caractéristiques physicochimiques (pH physiologique, salinité) permettent de les y injecter sans difficulté.

Afrique du Sud

La recherche de l'Afrique du Sud en nanotechnologie se centre actuellement sur des applications visant au développement social et à la croissance industrielle. Elle comprend la synthèse de nanoparticules, le développement de cellules solaires plus efficaces et moins coûteuses, des catalyseurs nanophasés hautement actifs et des électrocatalyseurs, des nanomembranes purifiant l'eau par catalyse, le développement de cellules produisant de l'énergie (*fuel-cells*), la synthèse de points quantiques et le développement de nanocomposites. Lancée en 2003, l'« Initiative de l'Afrique du Sud pour les nanotechnologies » (*South African Nanotechnology initiative*, SANi) vise à créer un important réseau d'universités, de conseils scientifiques et d'entreprises industrielles centré sur les domaines pouvant bénéficier à l'Afrique du Sud. La SANi, grâce à un budget initial s'élevant à environ \$E.-U. 3 millions, s'efforce également de stimuler et évaluer l'intérêt de la population pour la nanotechnologie. Actuellement, onze universités, cinq institutions de recherche (y compris la Commission nationale de recherche sur l'eau) et dix entreprises privées participent activement à cette initiative. Les domaines intéressant le secteur privé de l'Afrique du Sud semblent être la chimie et l'industrie du pétrole, la production d'énergie, les télécommunications, l'eau, la production minière, la production de peintures et celle de papier.

Mexique

Au Mexique, 13 centres de recherche et universités se consacrent aux nanotechnologies. En 2003, le Conseil national scientifique et technologique a alloué \$E.-U. 12,5 millions à 62 projets conduits par 19 institutions. La recherche sur les nanoparticules destinées à l'optique, la microélectronique, la catalyse, les revêtements ultrasolides et

l'électronique médicale font l'objet d'un grand intérêt. Plusieurs groupes centrent leur recherche sur les fullerènes (en particulier les nanotubes de carbone), les nanofils, les nanotamis moléculaires destinés à des revêtements ultrasolides, la catalyse, les nanocomposites et la nanoélectronique. De nouveaux nanocomposites polymériques sont créés pour fabriquer des matériaux hautement performants pour le transport ciblé de remèdes et produire des nanoscaffolds utilisés dans les applications de la médecine régénérative. En 2005, le soutien financier du gouvernement fédéral mexicain et d'investisseurs privés a permis aux chercheurs mexicains de réunir \$E.-U. 18 millions pour créer le Laboratoire national des nanotechnologies sous l'égide de l'Institut national d'astrophysique, d'optique et d'électronique. Ce budget a été alloué par le Conseil national scientifique et technologique, les gouvernements de plusieurs États de la Fédération mexicaine et Motorola.

PROBLÈMES DES PAYS EN DÉVELOPPEMENT DANS LE DOMAINE DES NANOTECHNOLOGIES

Selon certains, les nanotechnologies bouleverseront les exportations de matières brutes telles que le caoutchouc, le coton et divers produits agricoles dont dépendent plusieurs pays en développement. La demande de ces produits, maintenant essentiels, diminuera au fur et à mesure que les laboratoires se consacrant aux nanotechnologies produiront des substituts moins onéreux. D'autres prévoient que cela entraînera une vaste migration d'ouvriers agricoles et de ceux qui travaillent dans les mines et les usines (ETC Group, 2004). Ce n'est pas ce que pense notre groupe d'étude. Les progrès scientifiques et technologiques ont, certes, occasionné des changements inévitables à cause de l'automatisation de plusieurs travaux manuels dont la disparition est une conséquence normale du développement technologique et non des seules nanotechnologies. Qu'il s'agisse de pays développés ou en développement, la main d'œuvre s'est partout nécessairement adaptée à des changements techniques successifs. Outre les nombreux avantages, déjà énumérés, que les nanotechnologies offriront aux pays en développement, elles permettront d'offrir à leurs scientifiques et chercheurs la possibilité d'accélérer la transition de ces pays vers des économies reposant sur un savoir important. Il est toutefois essentiel de ne pas oublier que les effets économiques des nanotechnologies se feront sentir à divers degrés, notamment s'il s'agit des pays en développement les plus avancés, tels que l'Inde et la Chine, ou de ceux qui le sont moins.

Dans notre étude sur les innovations biotechnologiques concernant la santé dans sept pays (Thornsteindottir *et al.*, 2004), nous avons découvert que l'implication du secteur privé est le facteur-clé permettant de passer de la recherche théorique à ses applications. Les nanotechnologies affecteront tous les secteurs économiques. Les individus, les industries et les nations qui s'adapteront aux changements qu'elles entraîneront et qui y investiront leurs efforts de R&D profiteront des bénéfices et avantages qu'elles peuvent générer. Ceux qui n'en suivront pas le rythme survivront difficilement dans un environnement se modifiant vite et dépendant de plus en plus d'économies fondées sur le savoir scientifique et technologique (Enriquez, 2001).

MESURES NÉCESSAIRES EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ, DIRECTIVES ET IMPLICATION DES POUVOIRS PUBLICS

Effets sur l'environnement et la santé publique

S'il est clair que les nanotechnologies peuvent contribuer au bien-être humain, en particulier dans les pays en développement, les effets des nanomatériaux sur l'environnement ne sont pas tous actuellement connus. Il est possible que des nanoparticules s'accumulent dans divers organismes, s'incorporent à des tissus vivants et remontent dans la chaîne alimentaire selon le processus bien connu de bioaccumulation. Des expérimentations animales ont permis de découvrir que des nanoparticules inhalées peuvent se transporter de manière sélective dans le cerveau des mammifères *via* le nerf olfactif et que des nanotubes ont entraîné des lésions inflammatoires dans les poumons de souris. Une étude sur la perche commune a permis de découvrir une importante détérioration par oxydation des lipides du cerveau chez ces poissons exposés à des fullerènes solubles dans l'eau. Bien que ces études suggèrent que certains nanomatériaux peuvent être toxiques, nous ne disposons néanmoins pas de modélisations animales suffisantes pour prédire les effets qu'ils pourraient avoir chez des humains. Détailler ces risques n'est pas le sujet de ce chapitre, mais Theodore et Kunz (2005) en ont dressé une liste utile. Il faut toutefois souligner ici que nombre de produits industriels et de consommation courante sont déjà sur le marché – voir, par exemple, la liste dressée par Wolfe, 2005, et celle de nouveaux produits annoncés dans le *Project on Emerging Nanotechnologies* (2006).

Directives

Établir des directives, soit en utilisant celles existant déjà, soit en en créant de totalement nouvelles qui tiennent compte des nouvelles propriétés de la matière à nanoéchelle (Davies, 2006), est d'importance cruciale. Une réforme étant maintenant nécessaire, les gouvernements des pays développés et en développement doivent assurer que de nouveaux cadres soient conçus de manière logique, efficace, transparente et facilement adaptable aux rapides évolutions technologiques. Au niveau international, des directives visant à la protection contre l'exposition aux nanomatériaux sur le lieu de travail doivent être maintenant conçues de manière claire et précise. De plus, des définitions et normes internationales sont nécessaires pour mesurer la concentration et la toxicité des nanomatériaux dans l'environnement. Des organes indépendants et sous contrôle public devraient en être chargés. Une attention toute particulière doit porter sur la reconnaissance de la responsabilité individuelle des chercheurs et des ingénieurs travaillant dans la recherche sur les nanotechnologies et leurs applications. Le meilleur moyen d'empêcher leur usage inapproprié ou malveillant serait de créer des groupes d'utilisateurs suffisamment importants pour que les domaines sujets à des controverses soient identifiés le plus tôt possible. Il faudrait régler l'évolution du partage des bénéfices issus de la commercialisation des produits des nanotechnologies entre pays développés et pays en développement. Les moyens d'améliorer les droits de propriété intellectuelle devraient recevoir toute l'attention requise, car les pays les moins industrialisés ont souvent des difficultés à utiliser des moyens dépendant de brevets déposés par des universités, des entreprises ou le secteur militaire, ce qui inhibe leurs efforts en R&D. Il est également important de réduire les difficultés entourant les droits de propriété intellectuelle en offrant, d'une part, des incitations et des avantages à l'innovation et, d'autre part, en facilitant l'accès aux technologies qui en sont issues, en particulier celles qui sont importantes pour sauver des vies, ou dont la majorité ressent le besoin. Bien que ces questions soient complexes, il semble prudent d'éviter une injuste concentration des ressources à une minorité, car cela conduit à des « opacités patentes » risquant de freiner la R&D (Sabety, 2004). L'étude d'alternatives est en cours afin d'éviter ces problèmes, par exemple en créant des « réserves » et des centres d'échange de brevets, et afin d'offrir des sources de connaissances libres de droits et bien reconnues. Dans le domaine du transfert technologique, la Fondation africaine pour les

technologies agricoles (African Agricultural Technology Foundation, AATF) a négocié des brevets libres de droits et leurs droits dérivés avec leurs propriétaires – entreprises privées, partenariats entre le secteur public et le secteur privé, ONG – afin de permettre aux instituts de recherche des pays africains de pouvoir utiliser des technologies agricoles brevetées (AATF, 2002).

Implication du grand public

L'implication du grand public dans les importantes décisions concernant l'utilisation des nanotechnologies est loin d'être accessoire, mais essentielle. Le public ne peut cependant prendre des décisions éclairées si ses connaissances les concernant sont limitées. Éduquer le public est donc crucial, notamment en encourageant des débats bien informés sur les risques et les avantages en rapport avec ses craintes. Les débats publics devraient comprendre des discussions concernant le contrôle des nanotechnologies, l'accès à des informations dignes de confiance, les façons dont les nanotechnologies seront introduites dans la société, les risques impliqués, les groupes qui en bénéficieront ou seront soumis à certains risques et les individus qui seront responsables des problèmes générés par la recherche, le développement, la commercialisation et l'utilisation des applications nanotechnologiques. L'hostilité de l'opinion publique à l'encontre des organismes génétiquement modifiés révèle que la manière dont une technologie est perçue, quelles qu'en soient les preuves scientifiques, détermine son rejet ou son approbation. C'est pourquoi, bien qu'il soit difficile de déterminer ce qui est juste et bien, la promotion d'informations valides permettra au public de prendre des décisions objectives et rationnelles dans le meilleur intérêt de tous les usagers. Il est très difficile de modifier l'opinion publique une fois qu'elle s'est prononcée. Mieux le public comprend ce que sont les nanotechnologies, mieux il sera préparé à s'en faire une opinion rationnelle au lieu d'avoir des réactions épidermiques et impulsives. Répondre à des craintes légitimes et permettre aux pays en développement d'en évaluer pour eux-mêmes les avantages et les inconvénients favorisera le développement responsable des nanotechnologies et leur acceptation du public. Financer la recherche des sciences sociales sur les nanotechnologies est un bon moyen d'encourager la transparence dans les débats les concernant, car les sociologues peuvent les enrichir de leurs connaissances. En effet, leur pratique leur permet de savoir comment impliquer au mieux le public et les pouvoirs publics au cours

de ces discussions, tout en respectant l'intégrité professionnelle des chercheurs. De fait, l'apport des sociologues peut valoriser les avantages sociétaux des nanotechnologies tout en atténuant d'éventuelles controverses publiques risquant d'affaiblir leur image.

Impliquer les jeunes dans les débats sur ces technologies émergentes est vital si l'on veut que se développe une future population d'électeurs convenablement informés. En 2002, notre équipe – appartenant à ce qui était alors appelé le « Programme canadien de recherche sur le génome et la santé mondiale » – a conçu une unité de valeur universitaire intitulée « S'impliquer : les cellules souches » (*Engage: Stem Cells*) qui était destinée à ce que les lycéens canadiens débattent des questions de gouvernance éthique soulevées par cette technologie (<http://www.stemcellnetwork.ca/engage>). À la suite du grand succès remporté par cette stratégie, notre équipe en conçoit maintenant une autre, intitulée « S'impliquer : l'eau » (*WaterEngage*), qui vise le grand public afin de mieux l'informer des applications des nanotechnologies et de la biotechnologie dans l'approvisionnement en eau et son traitement, afin d'améliorer la vie des populations des pays en développement.

En 2003, l'ancien secrétaire général des Nations Unies, Kofi Annan, a souligné que « si chaque nation avait plein accès à la communauté scientifique mondiale dans son ensemble et la possibilité de développer de manière indépendante ses propres capacités, sa population pourrait discuter en toute sincérité avec ces scientifiques des avantages et des inconvénients dont ces nouvelles technologies sont porteuses, notamment de ceux des organismes génétiquement modifiés, si bien qu'il serait possible de prendre des décisions justifiées pour les introduire dans nos sociétés. » (Annan, 2003) De récentes études sur la perception qu'a le public des nanotechnologies émergentes (Macoubrie, 2005 ; Scheufele et Lewenstein, 2005) suggèrent que les citoyens souhaitent, d'une part, être mieux informés de leurs avantages et de leurs risques et, d'autre part, que de plus nombreux tests permettent de vérifier leurs effets sur l'environnement et la santé. Ces études encouragent les industries à tenir compte de ce message et recommandent divers mécanismes pour intégrer les citoyens aux prises de décisions des pouvoirs publics. Il est essentiel d'éviter des campagnes « publicitaires » exagérant les avantages de produits issus des nanotechnologies tout en passant les risques sous silence. L'un des moyens d'améliorer la participation citoyenne en S&T serait de réunir des jurys constitués de citoyens représentant diverses catégories de la société civile. Ces

jurys recommanderaient certaines orientations de la recherche sur les nanotechnologies, ainsi que des directives régulant leur utilisation. Le *Nano Jury UK*, un jury de ce type débattant des nanotechnologies au Royaume-Uni (<http://www.nanojury.org>), a réuni 20 personnes choisies au hasard pour prendre part à un débat sur les effets sociaux des nanotechnologies et servir de vecteur des différents points de vue de l'opinion publique pouvant influencer en ce sens les prises de décision gouvernementales.

L'AIDE DES PAYS INDUSTRIALISÉS AUX PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Défis mondiaux

L'un des moyens d'accélérer la mise en pratique des nanotechnologies pour qu'elles contribuent à résoudre les besoins des pays en développement consiste à exiger des meilleurs scientifiques du monde qu'ils s'y consacrent, en prenant pour modèle la Fondation pour les instituts nationaux de la santé (NIH) / Fondation de Bill et Melinda Gates pour les grands défis de la santé mondiale (*Grand Challenges in Global Health*) (Varmus *et al.*, 2003). Aux États-Unis, ce qui est compris comme un « grand défi » est un appel aux armes lancé aux chercheurs pour qu'ils concentrent leurs efforts sur une découverte scientifique ou technique spécifique visant à résoudre un ou plusieurs problèmes concernant le développement des moins nantis. Il s'agit aussi d'identifier les obstacles empêchant d'atteindre ce type d'objectifs. Cela permet que de multi-

Tableau 6.3 Projets des grands défis pour la santé mondiale comprenant une composante nanotechnologique

Grand défi n° 2 : préparer des vaccins n'exigeant pas une chaîne du froid

Spores bactériennes utilisées comme moyens de vaccination.

Vaccins thermostables à des températures non réfrigérées.

Grand défi n° 3 : systèmes de vaccination sans aiguille

Développement d'une technologie de vaccination ciblée par voie muqueuse.

Nano-émulsions utilisées comme adjuvants pour des vaccins par sprays nasaux.

Vaccination sans aiguille à l'aide de vaccins en poudre stable à inhaler.

Nanostructures à surface modifiée pour le transport de vaccins par voie transmuqueuse.

Grand défi n° 14 : développement de moyens de diagnostic associés à des interventions thérapeutiques rapides

Moyens de diagnostic associés à des interventions thérapeutiques rapides spécialement conçus pour le monde en développement.

Source : <http://www.grandchallengesgh.org/>

ples acteurs se penchent non seulement sur un problème particulier, mais encore sur des limites qui doivent être dépassées. Le projet intitulé « Résoudre les problèmes mondiaux grâce aux nanotechnologies » (*Addressing Global Challenges Using Nanotechnology*) travaille sur un plan d'action mobilisant la communauté internationale autour des dix applications nanotechnologiques en tête de la liste que nous avons dressée (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005 ; Singer *et al.*, 2005).

Sécuriser les financements

Les financements visant à résoudre les défis mondiaux grâce aux nanotechnologies pourraient provenir de plusieurs sources publiques et privées, de fondations nationales et internationales, de collaborations entre des programmes de nanotechnologies de pays industrialisés et de pays en développement. En février 2004, Paul Martin, ancien Premier ministre du Canada, a proposé que 5 % des investissements canadiens en R&D soient utilisés pour résoudre les problèmes du monde en développement (Government of Canada, Office of the Prime Minister, 2004). Si tous les pays industrialisés adoptaient cette politique, une partie des fonds ainsi réunis permettrait de les résoudre grâce aux nanotechnologies. De plus, les gouvernements des pays développés pourraient inciter leurs entreprises à consacrer une partie de leurs activités de R&D au progrès des nanotechnologies dans les pays les moins industrialisés. Parallèlement, le secteur privé pourrait recevoir des incitations financières pour qu'ils orientent une partie de leurs fonds en R&D afin de financer, par exemple, l'initiative « grands défis ».

Créer des collaborations Nord-Sud efficaces

Certains partenariats Nord-Sud sont des exemples déjà prometteurs. Ainsi, en 2005, l'Union européenne a alloué 285 millions d'euros (€) à son sixième programme-cadre (PC6) de coopération scientifique et technologique avec des pays tiers partenaires, comprenant notamment l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Chili, la Chine et l'Inde. Les nanosciences et les nanotechnologies sont un domaine de recherche prioritaire de ce programme auquel 1,429 millions d'euros (€) ont été alloués (Cordis, 2002). Le financement de la recherche nanotechnologique au Vietnam constitue, avec le Comité conjoint états-unis - Viet Nam pour la coopération scientifique et technologique (US-Vietnam Joint Committee for Science & Technology Cooperation), un autre exemple de ce type de collaboration. La communauté indo-américaine

de la Silicon Valley et des experts résidant en Inde qui se consacrent à la recherche nanotechnologique ont créé une plateforme de coopération avec des institutions universitaires, gouvernementales et privées, ainsi que des entreprises se trouvant en Inde, afin de coordonner les secteurs universitaires, gouvernementaux et celui des grandes sociétés, avec des entrepreneurs, de jeunes entreprises, des investisseurs, des *joint ventures*, des prestataires de services, des startups et des alliances stratégiques (Singer *et al.*, 2005 ; Singer *et al.*, 2006).

Créer de véritables collaborations Sud-Sud

Le succès avec lequel plusieurs pays en développement, notamment le Brésil, la Chine et l'Inde, ont résolu un certain nombre de leurs problèmes les plus pressants grâce à leur maîtrise des nanotechnologies devrait inspirer d'autres pays moins industrialisés. Ce succès est dû à plusieurs facteurs comprenant, notamment, le fait de centrer la recherche sur l'utilisation des nanotechnologies pour répondre à des besoins sanitaires locaux, une volonté politique, un soutien gouvernemental à long terme (en particulier, le développement de politiques spécifiques, le financement, la reconnaissance de l'importance des nanotechnologies en R&D, une attention particulière consacrée à la fuite des cerveaux et des incitations pour aider les entreprises locales productrices de nanotechnologies à surmonter des conditions économiques problématiques), une collaboration et des liens solides entre les universités, le gouvernement et le secteur industriel, la définition de créneaux intéressants, le recours à des avantages compétitifs et le développement du secteur privé (Thorsteinsdottir *et al.*, 2004). Le rapport de la Commission des Nations Unies sur le secteur privé et le développement, « Libérer l'esprit d'entreprise : mettre le monde des affaires au service des pauvres » (*Unleashing Entrepreneurship: Making Business Work for the Poor*, CSPD, 2004), sous-estime l'importance des partenariats avec le secteur privé, en particulier les secteurs privés des pays en développement, pour atteindre les OMD.

Faciliter le retour des connaissances grâce à la diaspora

Notre groupe a récemment lancé une étude de cas très poussée afin d'observer comment les diverses diasporas de chercheurs travaillant dans des pays développés peuvent contribuer de manière plus systématique à l'innovation et au développement de leurs pays d'origine (Séguin *et al.*, 2003). Ces diasporas réunissent des personnes qui, originaires d'un

pays en développement, l'ont quitté afin de poursuivre leurs études ou de trouver un meilleur emploi et travaillent à présent dans des universités, des centres de recherche ou des entreprises de pays développés. Ce mouvement de population, constitué d'hommes et de femmes très diplômés, est souvent désigné comme une « fuite des cerveaux » (*brain drain*) dont on pense habituellement qu'il a des effets dévastateurs sur le monde en développement. Au lieu de considérer que cette migration (très difficile à inverser) est une catastrophe à laquelle il est impossible de remédier, certains pays en développement ont mis en place plusieurs moyens visant à utiliser les capacités de ces émigrants dans les domaines scientifiques et technologiques, notamment en favorisant la communication avec eux et en créant des réseaux, leur gestion et leur financement. L'Inde encourage activement sa diaspora d'« Indiens non résidents » à contribuer au développement national lorsqu'ils reviennent au pays, et certains d'entre eux ont déjà remarquablement contribué à son secteur des TIC. Nous pensons que ces diasporas joueront un rôle majeur pour le développement des nanotechnologies dans les pays moins industrialisés.

La gouvernance mondiale

Une stratégie mondiale est nécessaire pour évaluer et promouvoir les nanotechnologies au service du développement. Alors que les modèles traditionnels de gouvernance ont tendance à se centrer sur les risques et les contraintes, un modèle plus holistique consiste à se centrer sur l'innovation et sur l'énorme potentiel que possèdent les nanotechnologies pour résoudre des problèmes mondiaux. Ce modèle pourrait insister pour qu'elles soient utilisées de manière responsable et définir leurs applications prioritaires et les politiques requises pour développer les capacités des pays en développement, et assurer que les bénéfices de la nanotechnologie reviennent à ceux qui en ont le plus besoin. Cette approche globale de la gouvernance indiquerait également à ces pays comment concevoir et appliquer des réglementations et directives concernant ce nouveau domaine. Plusieurs organisations ont récemment montré un intérêt croissant pour ces questions (Dowdeswell *et al.*, 2006). Les initiatives les plus remarquables comprennent celles lancées par l'Académie des sciences pour le monde en développement (anciennement nommée Académie des sciences du tiers monde, voir <http://www.twas.org> et www.cnr.ac.ma) et par son président, Mohamed Hassan, par le Dialogue mondial sur la nanotechnologie et les populations

pauvres de l'Institut Meridian (GNDP ; <http://www.meridian-nano.org/gdnp.php>), et par le programme sur les défis des nanotechnologies de l'Institut Foresight (*Foresight Nanotechnology Challenges*, 1986). Une réflexion devrait porter sur le modèle de gouvernance qui mobiliserait le mieux l'action internationale en institutionnalisant la coopération des pays dans la recherche nanotechnologique. Les conventions et traités internationaux ne sont peut-être pas suffisamment adaptés pour promouvoir les avantages des rapides progrès effectués dans ce domaine. Les négocier puis les ratifier sont des processus souvent très lents. De plus, leur entrée en vigueur n'implique pas pour autant que les pays y adhèrent avec enthousiasme. Un réseau international informel constitué de représentants des gouvernements, des universités, du monde des affaires et de la société civile, pourrait offrir un forum permettant d'instaurer un dialogue entre le public et les décideurs sur les orientations à donner aux institutions et aux politiques de R&D. La participation équitable, impliquant que la voix des pays en développement et celles de divers secteurs tels que la société civile et le monde de l'industrie et des affaires se fassent entendre, faciliterait la conception de stratégies visant à gérer les risques afin de promouvoir tous les avantages des nanotechnologies. Les réseaux déjà existants, les partenariats entre les secteurs publics et privés, ainsi que les efforts conjugués de tous pour créer une véritable capacité à l'échelle mondiale en sciences et technologies, y compris le Conseil interacadémique (*InterAcademy Council*, www.interacademycouncil.net) et le Nouveau Partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD, www.nepad.org), pourraient jouer un rôle important dans ce réseau mondial.

CONCLUSION

Les pays développés et les pays en développement doivent faire en sorte que les progrès des nanotechnologies soient orientés vers des solutions destinées à résoudre les problèmes les plus cruciaux dont souffre l'humanité. Concentrer les efforts de R&D pour instaurer un développement durable est essentiel. L'ancien secrétaire d'État américain, Colin Powell, dans son discours donné en 2002 à l'Académie nationale des sciences, a souligné ainsi : « Vous n'avez pas besoin [...] d'être secrétaire d'État pour observer le terrain où prend place le XXI^e siècle, ni pour comprendre que les sciences et les technologies sont nécessaires pour nourrir de leurs informations notre politique étrangère et la soutenir dans ce monde problématique où nous vivons. Qu'il s'agisse de créer

des conditions favorables au développement durable ou d'arrêter la pandémie du VIH/sida, la conception de notre politique étrangère doit reposer sur de solides fondations scientifiques. » (Powell, 2002)

Notre groupe avait auparavant pensé que les pays industrialisés devraient assumer la responsabilité d'une « diplomatie du génome » afin d'assurer que les populations des pays en développement profitent aussi des bénéfices de la révolution génomique (Daar *et al.*, 2003). De la même manière, nous avons ensuite proposé le concept d'une « nano-diplomatie » (Salamanca-Buentello *et al.*, 2005). Les pays développés et les pays en développement doivent intégrer leurs ressources nanotechnologiques à leur politique étrangère tout en donnant aux fonds publics et privés l'orientation qui permettrait au monde en développement de répondre aux défis du développement durable.

BIBLIOGRAPHIE

- African Agricultural Technology Foundation (AATF). 2002. *Rationale and design of the AATF*. Nairobi, Kenya : AATF. <http://www.aatf-africa.org/rationale.php> (accès 20 décembre 2006)
- Annan, K. 2003. "A challenge to the world's scientists". In : *Science*, Vol. 299, 1485.
- Benatar, S. R. ; Daar, A. S. ; Singer, P. A. 2005. "Global health challenges: The need for an expanded discourse on bioethics". In : *PLoS Medicine*, Vol. 2, No. 7, e143, 0587-0589.
- Community Research & Development Information Service (Cordis). 2002. *Integrating and Strengthening the European Research Area (2002-2006)*. Sixth Framework Programme. Brussels : Cordis. <http://cordis.europa.eu/nmp/home.html> and ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/documents_r5/natdir0000066/s_1883005_20040723_094518_1883en.pdf (accès 20 décembre 2006)
- Court, E. B. ; Daar, A. S. ; Martin, E. ; Acharya, T. ; Singer, P.A. 2004. "Will Prince Charles *et al.* diminish the opportunities of developing countries in nanotechnology?". In : *Nanotechnology and Society*, Vol. 4, No. 3. <http://www.nanotechweb.org/articles/society/3/1/1/1> (accès 20 décembre 2006)
- Court, E. B. ; Daar, A. S. ; Persad, D. L. ; Salamanca-Buentello, F. ; Singer, P. A. 2005. "Tiny technologies for the global good". In : *Nano Today*, May, 14-15.

- Daar, A. S. ; Dowdeswell, E. ; Singer, P. A. 2003. "Genome diplomacy: Canada's crucial role". In : *Policy Options*, Vol. 24, 56-61.
- Daar, A. S. ; Thorsteinsdóttir, H. ; Martin, D. ; Smith, A. C. ; Nast, S. ; Singer, P. 2002. "Top ten biotechnologies for improving health in developing countries". In : *Nature Genetics*, Vol. 23, 229-232.
- Davies, J. C. 2006. *Managing the Effects of Nanotechnology*. Washington, DC : Project on Emerging Nanotechnologies. http://www.wilsoncenter.org/index.cfm?topic_id=166192&fuseaction=topics.item&news_id=166192 (accès 20 décembre 2006)
- Dowdeswell, E. ; Daar, A. S. ; Acharya, T. : Singer, P. A. 2006. "Realizing the promise of genomics: Exploring governance". In : *International Journal of Technology and Globalization* (sous presse).
- Enriquez, J. 2001. *As the Future Catches You*. New York : Three Rivers Press.
- ETC Group. 2004. *Down on the Farm: The Impact of Nano-scale Technologies on Food and Agriculture*. Winnipeg : ETC Group.
- Foresight Nanotech Institute. 1986. *Foresight nanotechnology challenges*. Palo Alto, CA : Foresight Institute. <http://www.foresight.org/challenges> (accès 20 décembre 2006)
- Government of Canada, Office of the Prime Minister, 2004. *Complete text and videos of the Prime Minister's reply to the speech from the throne*. <http://www.pm.gc.ca/eng/news.asp?id=277> (accès 27 janvier 2005)
- Hassan, M. H. A. 2005. "Nanotechnology: Small things and big changes in the developing world". In : *Science*, Vol. 309, 65-66.
- Macoubrie, J. 2005. *Informed Public Perceptions of Nanotechnology and Trust in Government*. Washington, DC : Project on Emerging Nanotechnologies. <http://www.wilsoncenter.org/events/docs/macoubriereport.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Nimbkar Agricultural Research Institute (NARI). 2005. *Rocket science for rural development*. <http://nariphaltan.virtualave.net/rocketscience.pdf> (accès 20 décembre 2006)

- Powell, C. 2002. *Remarks to the 139th Annual Meeting of the National Academy of Sciences*. 30 April. Washington, DC : National Academy of Sciences.
http://www.nasonline.org/site/PageServer?pagename=NEWS_address_04302002_Powell_2002am (accès 20 décembre 2006)
- Project on Emerging Nanotechnologies. 2006. *A nanotechnology consumer products inventory*. Washington, DC : *Project on Emerging Nanotechnologies*.
<http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44> (accès 20 décembre 2006)
- Sabety, T. *Nanotechnology innovation and the patent thicket: Which IP policies promote growth?* Abstract of paper presented at the First Conference on Advanced Nanotechnology: Research, Applications, and Policy. 21-24 October 2004. Palo Alto, CA : Foresight Nanotech Institute.
<http://www.foresight.org/Conferences/AdvNano2004/Abstracts/Sabety> (accès 20 décembre 2006)
- Salamanca-Buentello, F. ; Persad, D. L. ; Court, E. B. ; Martin, D. K. ; Daar, A. S. ; Singer, P. A. 2005. "Nanotechnology and the developing world". In : *PLoS Medicine*, Vol. 2, No. 4, e97, 0300-0303.
http://www.utoronto.ca/jcb/home/documents/PLoS_nanotech.pdf (accès 20 décembre 2006)
- Scheufele, D. A. ; Lewenstein, B. V. 2005. "The public and nanotechnology: How citizens make sense of emerging technologies". In : *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, No. 6, 659-667.
- Séguin, B. ; Singer, P. A. ; Daar, A. S. 2003. "Scientific diasporas". In : *Science*, Vol. 312, 1602-1603.
- Singer, P. A. ; Daar, A. S. ; Salamanca-Buentello, F. ; Court, E. B. 2006. Nano-diplomacy. *Georgetown Journal of International Affairs*, Winter, 129-137.
<http://www.utoronto.ca/jcb/about/publications/nano-diplomacy.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Singer, P. A. ; Salamanca-Buentello, F. ; Daar, A. S. 2005. "Harnessing nanotechnology to improve global equity". In : *Issues in Science and Technology*, 9 July, 57-64.
- Theodore, L. ; Kunz, R. G. 2005. *Nanotechnology: Environmental Implications and Solutions*. Hoboken, NJ : Wiley.

- Thorsteinsdottir, H. ; Quach, U. ; Daar, A. S. ; Singer, P. A. 2004. "Conclusions: Promoting biotechnology innovation in developing countries". In : *Nature Biotechnology*, Vol. 22 Suppl, DC48-52.
- UN Millennium Project, Task Force on Science, Technology and Innovation. 2005. *Innovation: Applying Knowledge in Development*. New York : UN Millennium Project. http://www.unmillenniumproject.org/reports/tf_science.htm (accès 20 décembre 2006)
- United Nations. 2002. World Summit on Sustainable Development, 26 August-4 September 2000 in Johannesburg, South Africa. http://www.un.org/jsummit/html/documents/summit_docs.html (accès 20 décembre 2006)
- UN Commission on Private Sector and Development (CPSD). 2004. *Unleashing Entrepreneurship: Making Business Work for the Poor*. New York : UN Commission on Private Sector and Development. <http://www.undp.org/cpsd/documents/report/english/fullreport.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- United Nations Development Program (UNDP). 2001. *Human Development Report 2001: Making New Technologies Work for Human Development*. New York : UNDP. <http://hdr.undp.org/reports/global/2001/en> (accès 20 décembre 2006)
- UNESCO. 2005. *UNESCO World Report: Towards Knowledge Societies*. Paris : UNESCO. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001418/141843e.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Varmus, H. ; Klausner, R. ; Zerhouni, E. ; Acharya, T. ; Daar, A. S. ; Singer, P. A. 2003. "Grand challenges in global health". In : *Science*, Vol. 302, 398-399. <http://www.grandchallengesgh.org> (accès 20 décembre 2006)
- Wolfe, J. 2005. "Top ten nanotech products". In : *Forbes/Wolfe Nanotech Report*, 12 January. http://www.forbes.com/investmentnewsletters/2005/01/12/cz_jw_0112soapbox.html (accès 20 décembre 2006)

Chapitre 7

PARTICIPATION DU PUBLIC ET ÉDUCATION POUR L'ÉTHIQUE EN NANOTECHNOLOGIE

Kyunghee Choi

Certains des pays les plus industrialisés intègrent dans leurs secteurs innovants les nanotechnologies dont ils espèrent des bénéfices à court terme. Plus de 30 gouvernements ont déjà lancé des initiatives et commencé à faire d'importants investissements en R&D (Roco, 2003). Ces dépenses ont presque triplé entre 1997 et 2002 en Europe occidentale et dans de nombreux pays d'Asie et de la région du Pacifique, notamment l'Australie, la Chine et la Corée du Sud, qui y ont investi des sommes importantes.

Inutile de préciser que de nombreux aspects de la vie humaine bénéficieront des nanotechnologies. Ce mouvement vers le « nano-monde » implique, du moins théoriquement, d'exercer un contrôle absolu de la matière au niveau d'un seul atome ou d'une seule molécule. La nanotechnologie avancée permettra de construire des machines des milliers de fois plus puissantes et des centaines de fois moins coûteuses que celles dont nous disposons aujourd'hui.

La réflexion éthique concernant de nouvelles technologies est indispensable pour éviter que leurs utilisations aient des conséquences inattendues, voire parfois négatives. S'agissant d'en contrôler leur usage malveillant, ce n'est que récemment que les éducateurs et les scientifiques se sont intéressés à ces questions éthiques. Quant aux questions éthiques soulevées par les nanotechnologies, elles sont perçues différemment selon la culture du pays concerné, le système de croyances de sa population, ses traditions et son degré de développement.

Dès que l'on commence à identifier les questions éthiques concernant les nanotechnologies, il devient vite évident qu'elles présentent des points communs avec d'autres technologies, car les nanotechnologies – y compris les bionanotechnologies, les nanotechnologies de l'information et celles de l'environnement – sont des applications technologiques. Cela rend les questions éthiques les concernant encore plus complexes et globales. Un autre aspect qui concerne les technologies dans leur ensemble est la façon dont ces technologies pourraient affecter la vie quotidienne à l'avenir. Mieux comprendre leurs implications éthiques exigera donc sans cesse de nouvelles recherches (Roco et Tomellini, 2002).

Aujourd'hui, nombre de leurs effets potentiellement dangereux sont déjà identifiés et font l'objet de discussions. Par exemple, aux États-Unis, la National Science Foundation (NSF) a publié divers documents et rapports sur les implications sociales des nanosciences et des nanotechnologies. Dans l'Union européenne, leurs implications éthiques commencent à être discutées, notamment en Allemagne et au Danemark. Étant donnée la complexité de ces questions, certains pays ont entrepris d'en informer le public afin qu'il ait une meilleure compréhension des nanotechnologies lorsqu'elles s'appliquent à d'autres secteurs techniques, en particulier dans les institutions de la société civile, les écoles et autres bâtiments publics.

Ce chapitre examine tout d'abord comment impliquer le public pour que certains dilemmes éthiques soient résolus grâce à sa coopération avec le gouvernement et les industries. Il examine ensuite différentes stratégies pour enseigner de manière efficace l'éthique, y compris dans des programmes de formation continue en utilisant les ressources existant déjà – par exemple, les organisations de la société civile, les établissements scolaires, les universités et autres institutions publiques. Enfin, nous verrons comment diverses ressources et moyens employés dans d'autres domaines technologiques et d'autres pays peuvent être utilisés de manière efficace.

PARTICIPATION ET INITIATIVES PUBLIQUES

Les nanotechnologies peuvent être utilisées à des fins autant humanistes que perverses. Mnyusiwall *et al.* (2003) ont identifié plusieurs questions éthiques concernant les nanotechnologies dès leur développement initial et souligné que leurs effets éthiques et sociaux devraient être sérieusement analysés. C'est pourquoi le public devrait être alors impliqué, car

leurs poids peut se faire directement sentir sur la vie quotidienne de chacun. Il faudrait instaurer une communication active entre le public, les gouvernements, le monde industriel et d'autres parties prenantes pour déterminer les choix présentant des avantages et éviter de faire mauvais usage de ces technologies. Le public devrait pouvoir dialoguer avec les gouvernements et le monde industriel et leur demander de prendre les mesures appropriées. De plus, dès les premiers stades du développement et des applications des nanotechnologies, les journalistes doivent être impliqués dans ce dialogue, car ils exercent une importante influence sur la perception que le public peut avoir de leurs avantages.

Actions des ONG

Les ONG peuvent jouer un rôle crucial en renforçant l'opinion du public sur les technologies et de leurs effets sur la santé humaine et sur la société. Les ONG peuvent aussi proposer des directives et des recommandations qui éviteraient leur usage inconsidéré. Le rôle des ONG pourrait également consister à vérifier les conséquences des rapides progrès scientifiques et technologiques et à veiller à ce que ces progrès ne comportent pas de risques pour les humains ou pour l'environnement. Elles pourraient le faire en participant aux prises de décision, en s'efforçant d'influencer les modalités des applications et des évaluations des sciences et des technologies, secteurs souvent dominés par les gouvernements, le monde industriel et l'élite scientifique et technologique. Elles pourraient concevoir des moyens de stimuler la participation des citoyens dans l'élaboration des politiques scientifiques et technologiques, notamment en leur permettant d'avoir accès à des informations fiables et compréhensibles sur les innovations.

Veillant aux intérêts de la société civile, les ONG participent à la fois directement et indirectement aux décisions concernant les développements et les applications technologiques. Il est donc de leur ressort de stimuler la participation citoyenne au dialogue social lorsque des lois visant à réduire les risques inhérents aux nanotechnologies actuelles et futures sont préparées. Les activités des ONG sont cruciales, notamment lorsqu'elles organisent des discussions et des initiatives publiques visant à améliorer la conscience que les citoyens peuvent avoir des questions éthiques concernant les nanotechnologies.

Plusieurs ONG de la République de Corée ont joué ce rôle-clé en réunissant des scientifiques, des sociologues, des enseignants et

des étudiants en sciences naturelles. Les réunions régulières qu'elles ont organisées ont aidé les gens à comprendre la dimension sociale des sciences et des technologies. Ainsi, le People's Science Center, par exemple, a organisé des discussions sur les mesures légales prises par le gouvernement, grâce à des conférences, ateliers, communiqués de presse, émissions radiophoniques et télévisées, des forums et des déclarations de position, auxquels ont participé des experts et le public. Certaines ONG ont publié des lettres hebdomadaires d'information afin de tenir la population au courant de la progression des projets, produit des matériels éducatifs destinés aux enseignants et organisé des conférences publiques. Ces actions pourraient inspirer d'autres pays pour répondre à temps aux craintes exprimées par le public à propos du développement des nanotechnologies (CDST, 2005).

En 2001, un atelier sur les droits de l'homme destiné aux enseignants, intitulé « Droits civiques, éducation et sciences sous l'angle scientifique, technologique et sociologique » a été organisé par la Commission coréenne pour l'UNESCO dans le Centre Asie-Pacifique d'éducation pour la compréhension internationale (Asia-Pacific Centre of Education for International Understanding, APCEIU). Cet atelier a permis de concevoir un modèle des droits concernant ces domaines, de développer une réflexion critique sur les questions éthiques soulevées par la biotechnologie, de discuter des questions des récents progrès scientifiques et technologiques dans le secteur de l'éducation et, enfin, d'encourager les enseignants à s'organiser en réseaux pour qu'ils partagent leurs expériences concernant les droits de l'homme. Cet atelier a réuni une cinquantaine d'enseignants en sciences, des représentants gouvernementaux des régions et les délégués de plusieurs organisations telles que le Syndicat coréen des enseignants et éducateurs, l'ONG « Science », le PSPD ou « Solidarité populaire pour la démocratie participative », le domaine « sciences, technologies et société » (Science-Technology-Society, STS) et des éducateurs environnementaux. Le dernier jour de cet atelier, des enseignants ont examiné comment mettre en place une éducation active aux droits de l'homme. Tous ces participants se sont déclarés satisfaits et ils ont souhaité participer à l'avenir à des réunions analogues (CDST, 2005).

Au Canada, le Groupe d'action sur l'érosion, la technologie et la concentration (des polluants) ou ETC Group est l'une des ONG qui plaident le plus activement en faveur du principe de précaution et cherchent à ce que la fabrication de produits nanotechnologiques soit

suspendue jusqu'à ce que leur sécurité soit prouvée. Ce groupe a publié un rapport qui, intitulé *The Big Down* (« La grande déprime »), analyse le développement des nanotechnologies, leurs produits et leurs effets sociaux (ETC Group, 2003).

Implication des gouvernements dans la « nanodiscussion »

En reconnaissant les implications éthiques et les effets sociaux du progrès technologique, les gouvernements se sont efforcés de faciliter des « nanodiscussions » entre les parties prenantes afin de communiquer et échanger leurs différents points de vue. La détermination avec laquelle les gouvernements font de lourds investissements dans les nanotechnologies oblige, elle aussi, à examiner toutes les conséquences de R&D dans ce domaine et, en particulier, leurs effets sur la société.

Dans le domaine de la nanobiotechnologie, les nanotechnologies peuvent s'avérer utiles pour la prévention, le diagnostic et le traitement de plusieurs maladies et handicaps. Les progrès des nanotechnologies permettent déjà d'établir des diagnostics précoces et d'améliorer les transplantations et les méthodes de réparation cellulaires ; c'est en soi une bonne nouvelle. Ces progrès comprennent la possibilité d'insérer des matériaux artificiels ou d'introduire des nanomachines dans le corps humain, notamment d'y implanter des puces électroniques. Ces modifications de systèmes vivants et la possibilité d'implanter des matériaux artificiels ou des machines chez des humains soulèvent néanmoins un fort scepticisme.

Afin d'atténuer les problèmes éthiques que tout cela entraîne, l'intervention des gouvernements s'avère nécessaire pour réguler les expériences sur la fabrication et l'utilisation d'implants dans le cerveau. En effet, leurs implications dépassent les questions concernant habituellement l'éthique et la sécurité et rendent nécessaires de nouvelles lois sur les actions répréhensibles commises par des personnes sous l'influence de ces interventions. Ainsi, Vogel (2001) se demande qui peut être tenu pour responsable lorsqu'une personne commet un crime sous l'influence d'implants contrôlés de l'extérieur. Les effets secondaires éventuels de cette technologie doivent donc être examinés de manière holistique, juridique et sociale.

Dans certains pays, notamment l'Australie, les États-Unis et le Royaume-Uni, des organisations agréées par les gouvernements ont entrepris diverses activités éducatives destinées à lancer le débat public

où échanger points de vue et opinions. Aux États-Unis, le président Clinton a annoncé, en 2000, qu'il soutiendrait la R&D en nanotechnologie. En novembre de la même année, des plans nationaux de nanodéveloppement ont été approuvés et cinq domaines de recherche identifiés, dont celui concernant les effets de la nanotechnologie sur la société. C'est dans ce contexte que le sous-comité sur la nanoéchelle, la science, l'ingénierie et la technologie, dépendant de la Commission nationale pour les sciences et les technologies (NSTC) a organisé des ateliers sur les implications sociales de la nanoscience et de la nanotechnologie. Différentes questions y ont été discutées, notamment les effets de la nanotechnologie sur la médecine, l'environnement, l'emploi, la sécurité nationale, l'éthique, les lois et la culture, et divers documents y ont été distribués (Roco et Bainbridge, 2001). Un peu plus tard, la National Science Foundation (NSF) a organisé un atelier intitulé « La nanotechnologie : opportunités révolutionnaires et implications sociales » ; ses participants ont élargi la discussion en y ajoutant, notamment, les attitudes du public, les méthodes de communication et les stratégies éducatives concernant les nanotechnologies (Roco et Tomellini, 2002).

Au Royaume-Uni, la Société royale et l'Académie royale de l'ingénierie (Royal Society and Royal Academy of Engineering) ont organisé conjointement des ateliers et des conférences sur les nanotechnologies. En 2003, elles ont publié divers documents avec le soutien du Département national du commerce et des échanges, puis, en juillet 2004, un rapport intitulé *Nanotechnology and Nanoscience: Opportunities and Ambiguity* (« Nanotechnologies et nanosciences : opportunités et ambiguïtés »). Ce rapport définit leurs limites, décrit l'état des connaissances scientifiques les concernant, identifie ses applications potentielles et discute des questions de sécurité environnementales actuelles et à venir (Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004).

Les questions éthiques et sociales concernant la santé ont également été analysées. Il est important de souligner ici que ces activités se sont déroulées sans intervention gouvernementale, bien que financées par le gouvernement. Les aspects négatifs des nanotechnologies, leurs futures ambiguïtés y ont aussi fait l'objet de discussions, et des principes de précaution pour les contrôler y ont été formulés (ETC Group, 2004).

La participation du public concernant les politiques en jeu s'est déroulée de manière ascendante (*bottom-up*). Le public ayant demandé

au gouvernement d'agir, ce dernier a admis que les effets secondaires des nanotechnologies et des nanomatériaux – comme les nanoparticules et les nanotubes – pouvaient être ambigus, et il a annoncé son intention de constituer prochainement un « groupe pour le dialogue sur les nanotechnologies » (Nanotechnologies Issues Dialogue Group, NIDG).

Le 25 mai 2005, un groupe de « nanojuristes » s'est constitué dans le Yorkshire. Ce « nanojury » est l'un des moyens utilisés au Royaume-Uni pour faciliter la participation et l'expression citoyennes. Vingt personnes sélectionnées au hasard ont accepté de participer pendant cinq semaines à une série de conférences sur l'utilisation et les risques des nanotechnologies. Ensuite, elles ont donné leur opinion sur les recommandations finalement proposées. Ce type d'événement facilite non seulement la communication d'informations sur les nanotechnologies vers le grand public, mais encore l'échange des points de vue et opinions parmi les parties prenantes (Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2004).

Un nanodialogue pour les groupes intéressés

En ce moment, les questions éthiques concernant les nanotechnologies donnent lieu à moins de discussions que celles concernant de manière générale la R&D. Cette absence de dialogue entraîne le manque de solutions. Un dialogue sur les questions éthiques doit prendre place entre des instituts de recherche, les organismes de financement et le public ; tous les aspects du développement des nanotechnologies et de leurs résultats doivent être analysés sous des angles différents, professionnels ou non. Ce dialogue éthique pourra stimuler une réflexion critique chez la population, accroissant ainsi sa connaissance des avantages et des dangers potentiels des nanotechnologies.

Des groupes d'intérêts communs devraient être constitués et comprendre des scientifiques, des chercheurs, des médecins, des étudiants et des représentants du monde industriel. Ce dialogue devrait générer des interactions entre les sciences, le secteur économique et industriel, ainsi que celui de l'éducation. Il devrait avoir pour but d'instaurer leur collaboration pour répondre aux objectifs que les parties prenantes ont en commun. Un mécanisme novateur pourrait rendre les professionnels et les industriels plus conscients des conséquences éthiques. Par exemple, pour continuer de pratiquer leur art de manière éthique et humaine, les médecins devraient mieux connaître la dimension éthique de la nanomédecine. Les étudiants en médecine et les

médecins universitaires devraient bénéficier d'une formation classique en bioéthique et les praticiens, d'une formation continue.

L'Observatoire des sciences et des technologies (Office of Science and Technology, OST) du Royaume-Uni a lancé plusieurs programmes scientifiques et technologiques centrés sur l'être humain et la société. Des représentants du gouvernement, des scientifiques et le public y ont participé. Le *Sciencewise Grand Scheme*, un projet d'éducation du grand public sur l'éthique et les questions environnementales soulevées par les technologies, a été lancé en septembre 2004. Parmi les ONG britanniques, le Nanotech Engagement Group (NEG) a poursuivi des « nanodialogues » pendant plus de deux ans avec le Centre de nanosciences de l'université de Cambridge et l'Institut d'études politiques de l'université East Englia (ETC Group, 2004).

En Australie, le Département national de l'industrie, des sciences et des ressources a organisé un atelier sur la nanotechnologie dans l'industrie australienne. Ses participants ont discuté non seulement de diverses opportunités de transfert des nanotechnologies grâce à la collaboration d'autres secteurs et groupes, mais encore des changements éthiques qui pourraient en découler. Bien qu'aucune solution n'ait été trouvée, il a été conclu que les implications éthiques des nanotechnologies réclamaient des actions adéquates, nationales et interdisciplinaires. En effet, la communication entre professionnels ou secteurs permet de choisir les meilleurs avantages et de faire en sorte que les inconvénients soient minimisés.

L'ENSEIGNEMENT ÉTHIQUE CONCERNANT LES NANOTECHNOLOGIES

Une partie des travaux de l'ONU est consacrée à promouvoir l'enseignement de l'éthique. En 2002, les chefs d'État réunis lors du Sommet mondial sur le développement durable tenu à Johannesburg ont réaffirmé la nécessité d'instaurer une éducation allant en ce sens. En 1999, la Conférence mondiale sur la science et l'utilisation du savoir scientifique organisée par l'UNESCO et l'ICSU (Conseil international pour la science) à Budapest, a clairement énoncé ce besoin dans une déclaration affirmant que l'enseignement de l'éthique et de la responsabilité doivent faire partie de la formation de tous les scientifiques (COMEST, 2003).

La plupart du temps, l'enseignement d'une discipline consiste à commencer par la définir elle-même, puis à dispenser progressivement

les connaissances relevant de son domaine. La division des universités en différentes sections se fonde sur cette approche. Ainsi, chaque discipline laisse son empreinte sur la manière dont les étudiants vont réfléchir. Bien que le contexte culturel et les systèmes de croyances déterminent la manière dont l'éthique est abordée, les étudiants doivent savoir prendre position sur les questions qu'elle soulève, puis observer comment les technologies qui nous sont familières affectent la vie quotidienne de la société.

Il est donc essentiel que ces jeunes développent le plus tôt possible leur sens de l'éthique et une opinion personnelle. Les enseignements dispensés de manière générale aux étudiants et, plus particulièrement, aux futurs scientifiques doivent rechercher un certain équilibre entre certaines valeurs et les opinions personnelles de ces jeunes. À cette fin, les enseignants, les conseillers et administrateurs universitaires devraient être les premiers formés aux dimensions éthiques et sociales des sciences et des technologies pour pouvoir ensuite dispenser des enseignements efficaces dans ce domaine. Ils devraient présenter de manière claire et approfondie les aspects positifs de ce que les sciences et technologies peuvent apporter à la société. Ils devraient également former les étudiants à avoir une pensée critique et rationnelle et veiller à ce qu'ils sachent établir une limite entre ce que les technologies peuvent offrir de positif comme de négatif. L'apprentissage précoce du raisonnement éthique aiderait les étudiants à développer leur conscience de ce qui va dans le sens des intérêts de l'humanité.

La raison d'être d'un enseignement de l'éthique

Selon la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST), l'enseignement de l'éthique vise à développer chez les étudiants la capacité d'identifier et d'analyser les questions éthiques pour trouver des solutions rationnelles. Il s'agit, en quelque sorte, de développer chez eux une conscience morale et une sensibilité éthique non seulement pendant leur cursus universitaire à proprement parler, mais encore au-delà du cursus lui-même, de manière informelle. Cette approche leur permettrait de mieux être conscients des normes permettant de distinguer, par exemple, les aspects techniques des aspects éthiques des nanotechnologies. Ainsi, les étudiants pourraient réfléchir de manière critique aux questions éthiques les plus brûlantes dans le monde d'aujourd'hui, en particulier dans les pays en transition.

Les questions éthiques sont abordées différemment selon le contexte culturel et les régions, comme nous l'avons déjà vu, mais aussi en fonction du moment où des problèmes éthiques sont réellement perçus. Ici encore, l'éducation permet de mieux répondre à ces questions (COMEST, 2003).

L'enseignement de la nanoéthique

L'enseignement de l'éthique n'a jamais été aussi intense qu'aujourd'hui (COMEST, 2003). Pour devenir capables de prendre des décisions éthiques justifiées, qu'il s'agisse de questions simples ou complexes, les étudiants doivent recevoir un enseignement comprenant les divers domaines auxquels la notion d'éthique s'applique.

Dans les établissements d'enseignement secondaire

L'enseignement des sciences vise aujourd'hui à mieux comprendre la nature et ses interactions avec les sciences, les technologies et la société. Cette nouvelle approche montre que la science, au lieu d'être conçue séparément de la société, y joue un rôle vital. Depuis les années 1980, l'ensemble constitué par les sciences, les technologies et la société (STS) est partout considéré comme un domaine à part entière. C'est pourquoi de nouveaux programmes et matériels éducatifs lui sont spécialement consacrés (Roy et Waks, 1985 ; Vazquez-Alonso et Manassero-Mas, 1999).

Ce nouveau domaine a été introduit par le sixième curriculum national de la République de Corée dans les écoles élémentaires et primaires. Le septième curriculum national a donné plus d'importance aux STS en soulignant que leur enseignement devrait contribuer à atteindre ses quatre principaux objectifs, notamment grâce au curriculum sur le thème « Vie et sciences » destiné aux collèges et lycées (Choi, 1996).

Ce nouveau curriculum et les matériels éducatifs l'accompagnant se sont avérés très utiles pour introduire l'enseignement de l'éthique dans le cadre universitaire. Des initiatives analogues concernant la biotechnologie ont déjà pris place dans d'autres pays. Ainsi, la Commission européenne a contribué à la publication de cours à l'usage des jeunes de 16 à 19 ans lancés par l'Initiative européenne pour une éducation aux biotechnologies (EIBE). Conçus sous la forme de modules, ils comprennent des travaux pratiques accompagnés de protocoles expérimentaux, de jeux de rôle, d'informations et de thèmes de débats (<http://>

www.eibe.info). Tous ces modules sont enrichis d'informations sur la recherche provenant d'articles, de revues, de livres récemment parus, de directives éthiques, et ils proposent diverses activités pour animer ces programmes éducatifs (EIBE, 2002).

Aux États-Unis, le Programme des études en sciences biologiques (Biological Sciences Curriculum Study, BSCS), financé par l'Institut national de recherche sur le génome humain (National Human Genome Research Institute, NHGRI) et par le Département de l'énergie, a créé en 1992 un programme destiné aux établissements d'enseignement secondaire sur les implications éthiques, juridiques et sociales (Ethical, Legal and Social Implications, ELSI) du Projet sur le génome environnemental (*Environmental Genome Project*, voir <http://www.niehs.nih.gov/envgenom/elsi.htm>). Une dizaine de programmes éducatifs sur ces questions sont maintenant distribués gratuitement à plus de 50 000 enseignants. Le Centre d'éthique professionnelle appliquée (Applied Professional Ethics Center) de l'université du Tennessee a créé, lui aussi, un enseignement sur « les impacts sociaux de l'ingénierie de la génétique humaine » accompagné de matériels audiovisuels et autres destinés à lancer les débats dans les collèges et lycées (NHGRI, 2001).

L'Institut Kennedy d'éthique, de l'université de Georgetown, a conçu un curriculum de bioéthique centré sur les questions éthiques (*High School Bioethics Curriculum Project*, HSBCP) concernant la biotechnologie et destiné aux établissements d'enseignement secondaire. Ce programme est divisé en quatre sections (éthique de la recherche, eugénisme, maladies génétiques et transplantation d'organes) présentant chacune de cinq à huit cas. Les enseignants doivent préparer leurs cours en fonction d'objectifs précis et fournir aux étudiants une liste de livres qu'ils doivent lire avant un débat (Downie, 1993).

Le Département de génétique de l'université de Washington, à Seattle, offre d'autres exemples des enseignements destinés aux étudiants, ainsi qu'au grand public. Ainsi, son « Projet sur le génome humain » destiné aux établissements d'enseignement secondaire est centré sur l'analyse de l'ADN, l'éthique et la biotechnologie, la maladie de Huntington et le clonage humain.

Le Royaume-Uni a créé un Centre national pour l'enseignement de la biotechnologie (National Centre for Biotechnology Education, NCBE) en 1985 afin que le public enrichisse ses connaissances sur la biotechnologie. Depuis, le NCBE a produit des matériels éducatifs

dont certains permettent de faire diverses expériences dans les écoles. À ce jour, 26 pays les ont achetés. Une étude de l'université de Leeds a accordé la note la plus élevée au NCBE pour ces matériels très novateurs, conçus pour les professeurs des écoles.

Toutes ces activités éducatives en ont stimulé d'autres à travers le monde. Le Japon a offert une publication intitulée *Directives pour la bioéthique*, accompagnée de matériels d'éducation active, à 500 établissements d'enseignement secondaire, niveau auquel il est, depuis, envisagé de créer des classes de bioéthique (Mays, 1998).

Conçues au début des années 1990, ces activités visant à l'enseignement de plusieurs domaines technologiques, en particulier la biotechnologie, n'intégraient évidemment pas encore la nanotechnologie.

Dans les universités

Cours à option. Les jeunes ont besoin de compléter leurs connaissances scientifiques d'enseignements destinés à les mettre à niveau de la recherche actuelle. Ces enseignements doivent commencer dès les études primaires pour se poursuivre au niveau universitaire si l'on veut stimuler l'intérêt des jeunes pour les STS, faciliter ainsi leur accès à la recherche et faire en sorte qu'ils sachent plus tard répondre aux besoins de la société. Cela ne peut donc se faire qu'en créant des matériels pédagogiques conçus pour dispenser une éducation globale compatible avec l'enseignement des STS.

Depuis 1991, les étudiants de l'université de Beijing préparant une licence ou un doctorat dans le Centre pour la recherche des lois scientifiques doivent suivre un cours sur l'éthique biologique. Ce cours vise à enrichir à la fois leurs connaissances scientifiques et leur expérience humaine.

Des matériels destinés à des cours à option ont été créés dans les universités par la République de Corée afin que les étudiants comprennent mieux les interactions existant en STS dans leur pays ; cela leur permet de mieux comprendre que la nature même de la science a un impact sur la vie quotidienne (Choi *et al.*, 2005). Ce cours est dispensé à 265 étudiants des première et deuxième années, qu'ils préparent un diplôme en lettres, beaux-arts, sciences sociales, sciences naturelles ou ingénierie. Les étudiants peuvent ainsi améliorer leur savoir scientifique. Lorsqu'ils ont ensuite été interrogés sur l'utilité de ces cours, leurs réponses ont varié selon la discipline qu'ils étudiaient, leur niveau et

leur intérêt pour les sciences. Toutefois, 97,7 % d'entre eux ont répondu que ces cours leur étaient utiles (Choi *et al.*, 2005).

Les cursus universitaires actuels n'offrent pas la possibilité d'améliorer leurs connaissances en STS. C'est pourquoi les STS devraient être abordés des classes primaires au collège pour être ensuite enseignés de manière plus spécifique dans les universités par des éthiciens. En effet, bien que l'éthique soit l'affaire de tous, tout le monde ne peut être qualifié pour l'enseigner, car il faut, pour bien le faire, avoir reçu une solide formation comprenant les théories de l'éthique et ses méthodes de discussion. Enfin, ces enseignements devraient bénéficier de financements permettant l'achat de matériels pédagogiques, y compris audiovisuels, car des cours théoriques seuls sont insuffisants pour que les étudiants soient confrontés à la réalité des faits.

Niveau master. Depuis septembre 2003, l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, propose un master en éthique appliquée. Ce programme d'une année, dispensé en anglais, offre aux étudiants venant de diverses disciplines – médecine, médecine vétérinaire, biologie, philosophie, théologie et droit – un enseignement comprenant les différentes théories éthiques, ainsi que les méthodes les plus importantes de la discussion éthique.

L'université de Zagreb, en République de Croatie, propose un master d'éthique, santé et droits de l'homme aux professionnels de l'Europe du Sud-Est. Ce programme, étendu sur deux années et comprenant douze modules sur la bioéthique et cinq sur ses méthodes pratiques, vise à stimuler la réflexion critique et la sensibilité morale des étudiants.

Ces trois masters sont destinés à former des professionnels à l'éthique. D'autres enseignements sont proposés à des étudiants possédant une licence dans une autre discipline que l'éthique, mais non sans relation avec cette dernière. Ces programmes leur permettent donc d'approfondir leurs connaissances dans ce domaine.

La recherche éthique pour le curriculum scolaire

Les activités visant à renforcer les questions éthiques, juridiques et sociales dans la recherche doivent commencer dès le début des études universitaires. Les étudiants peuvent alors affiner leur esprit d'analyse, développer et partager leur savoir et leurs opinions avec d'autres jeunes commençant leurs études universitaires, avec les doctorants, postdocto-

rants, maîtres de conférences et professeurs. Leur attribuer des bourses et des prix récompensant leurs efforts est très stimulant. C'est pourquoi les pouvoirs publics devraient augmenter le montant des bourses et les financements de la recherche, en particulier celle portant sur les questions éthiques, juridiques et sociales (Ethical, Legal and Social Issues, ELSI).

Les diplômés (licence, master ou doctorat) impliquant la rédaction d'un mémoire, il faudrait que les futurs chercheurs et scientifiques se familiarisent avec les questions éthiques, juridiques et sociales concernant la recherche technologique au cours de leurs études. La COMEST (2003) a suggéré que les étudiants intègrent dans leur mémoire les questions éthiques concernant le sujet traité, ainsi que les problèmes inhérents à la recherche éthique elle-même et ceux que posent les applications éventuelles de leur propre recherche.

Une autre idée serait que les chercheurs réservent un certain pourcentage de leur budget pour le consacrer aux questions éthiques soulevées par leur recherche. C'est ainsi qu'il a été décidé que de 3 à 5 % du budget du Projet américain sur le génome humain seraient consacrés à la recherche en ELSI. En Asie, aucun pourcentage n'est réservé à la recherche en ELSI dans les budgets alloués chaque année au développement des nanotechnologies. Ce problème mérite donc d'être sérieusement examiné.

L'Association pour l'éthique pratique et professionnelle de Bloomington (Indiana, États-Unis) a publié une série de six ouvrages consacrés à la recherche éthique et à des études de cas. Depuis 1996, chaque année, cette association y organise un atelier réunissant les étudiants en licence scientifique et en ingénierie. Chaque participant est invité à produire alors un mémoire portant sur une étude commentée de cas comprenant une grande diversité de sujets, y compris la recherche sur des sujets humains et les droits de propriété intellectuelle (COMEST, 2003).

Éducation du grand public associée à des programmes universitaires

Les professionnels, scientifiques et experts en technologie devraient bénéficier d'une formation continue en ELSI. Certains pays proposent déjà ce type de formation dans certains domaines techniques, mais pas encore en nanotechnologie. Certains organismes associés aux universités et instituts offrent déjà de tels programmes au grand public. Aux États-Unis, le Centre de formation à la génétique (Genetics Science

Learning Center, GSLC) de l'université de l'Utah est hébergé par le Centre de recherche sur le génome humain (HGSRGC). Ce dernier propose des conférences destinées aux professionnels et au grand public, ainsi que des directives et des forums sur la bioéthique. Le contenu de ces programmes est préparé par des chercheurs et des experts de cette université. Étant donnée l'importance qui doit être accordée à l'étude des implications éthiques et sociales des technologies, ces programmes devraient être conçus dans une perspective interdisciplinaire.

Formation continue

Outre les enseignements conduisant à l'obtention de diplômes, les professionnels et les chercheurs devraient pouvoir bénéficier d'une formation éthique continue. Une fois encore, la biotechnologie peut proposer des exemples. Aux États-Unis, le programme GenEd (*Genome Education*) est un modèle intéressant ; il vise à former des experts en ELSI dans un cadre universitaire, ainsi qu'à fournir une formation continue dans ce domaine à des professionnels de la santé (NCHPEG, 2002). Ce programme comporte une partie permettant d'évaluer l'adéquation de cette formation à la recherche génomique et celle d'une formation destinée aux professionnels de la santé non spécialisés dans ce domaine. Dans l'Union européenne, cette formation professionnelle est devenue obligatoire pour les médecins experts du Royaume-Uni et des Pays-Bas, mais elle reste une option en Allemagne, en France et en Suède (Micklos et Carlson, 2000).

Les programmes de formation continue visent à mettre les professionnels au courant des récentes découvertes concernant les questions éthiques, juridiques et sociales en sciences et technologies de façon à qu'ils en comprennent mieux les conséquences éventuelles. Il serait donc logique que les professionnels et les scientifiques travaillant dans des secteurs concernés par les nanotechnologies soient obligés de suivre ces formations continues.

La COMEST (2003) pense que l'enseignement de l'éthique destiné aux scientifiques exige que de solides compétences dans cette discipline soient conjuguées à de sérieuses connaissances dans le domaine scientifique faisant l'objet de discussions éthiques. Cette double compétence est nécessaire pour que la discussion fasse sens et soit efficace. Elle permet de distinguer les arguments fondés de ceux qui ne le sont pas. Sinon, les scientifiques risquent de confondre l'éthique avec leurs propres opinions et les éthiciens de proposer des arguments et des considérations sans fondement réel. La formation permanente

peut offrir aux scientifiques et aux chercheurs le moyen d'approfondir leurs connaissances de l'éthique et de devenir ainsi plus compétents dans leur domaine (COMEST, 2003). De plus, quelle que soit leur forme, les enseignements dispensés à la fois par des scientifiques et des éthiciens donnent de très bons résultats. Il en est de même de la recherche lorsqu'un ou plusieurs éthiciens font partie des équipes de chercheurs (Roy et Waks, 1985).

L'éducation informelle

La formation scientifique informelle existe sous diverses formes pour compléter une formation universitaire. Elle est de plus en plus comparable à celle dispensée de manière classique et comprend des programmes télévisés, radiophoniques, des films et Internet. Les musées et centres de recherche scientifiques, les planétariums, les zoos et aquariums, les jardins botaniques et les parcs, les centres d'éducation à la nature et à l'environnement, ainsi que les laboratoires de recherche offrent tous des moyens d'enrichir ses connaissances. Les associations, y compris celles destinées à la jeunesse, et les services municipaux peuvent aussi proposer des programmes d'éducation scientifique. Dans tous les pays et en très peu de temps, des centres scientifiques ont émergé, chacun avec ses caractéristiques particulières (Song *et al.*, 2002). L'éducation sociale et la formation continue gagnant de l'importance, l'éducation fait désormais partie des fonctions les plus importantes des musées.

Le rôle éducatif des musées et centres scientifiques

La formation précoce aux sciences, ainsi qu'aux méthodes de la pensée critique et de la prise de décision peut commencer progressivement, en fonction de l'âge de ceux à qui elle est dispensée. Les musées ne se cantonnent désormais plus à exposer des objets dans des vitrines et ils ont pris une dimension sociale, économique et politique (Song *et al.*, 2002). Leur rôle consiste également à être un lieu de formation active et permanente, fondée sur l'expérimentation. Cela explique sans doute la rapide expansion des centres scientifiques depuis quelques années. Remplissant une fonction à la fois culturelle et sociale, ils permettent au public de comprendre l'évolution des technologies, de prévoir les conséquences de leurs progrès et de comprendre leurs relations avec le développement humain, la dignité humaine, les droits de l'homme et d'autres questions éthiques. Ainsi, les musées scientifiques offrent un espace où le public peut obtenir des informations objectives sur les

divers aspects du développement scientifique et devenir plus conscient des questions éthiques, juridiques et sociales qu'ils soulèvent. Il serait souhaitable que les musées scientifiques conçoivent leurs expositions de façon à ce que les dimensions éthiques et sociales des nanotechnologies stimulent chez les citoyens et les étudiants une réflexion sur les coûts et les avantages de ce domaine.

Bien que de nombreuses expositions soient financées par des industries ou des entreprises, favorisant donc d'une certaine façon leurs sponsors, l'efficacité des musées s'est avérée remarquable pour familiariser le grand public avec la science. Les rapides progrès des sciences et technologies ressentis maintenant dans presque toutes les activités humaines ont généré un vaste ensemble de questions éthiques et morales.

Nombre de musées ou centres scientifiques en Allemagne, en Corée et aux États-Unis présentent divers aspects des nanotechnologies et, s'ils en ont effectivement introduit le concept, ils n'ont pas suffisamment développé leurs implications éthiques. Selon certaines critiques, beaucoup présentent les avantages des nanotechnologies de manière à attirer l'intérêt du public, mais ils omettent les questions sociales et éthiques qu'elles soulèvent. Toutefois, les questions éthiques concernant les sciences et technologies étant maintenant devenues plus urgentes dans notre société, à cause de leurs progrès rapides, le public devrait désormais en avoir une meilleure compréhension pour résoudre les problèmes complexes auxquels sont confrontées les démocraties modernes. Le musée des Sciences de Boston présente une exposition initiant le public aux nanosciences et aux nanotubes de carbone. Le Deutsches Museum de Munich propose une exposition accompagnée d'expériences sur la recherche nanotechnologique et génétique. Ce musée propose également des informations sur les innovations et ces merveilleux phénomènes que les nanotechnologies, combinées à la médecine, aux nouveaux matériaux et à l'informatique, peuvent produire. Le musée national des Sciences de la République de Corée a conçu des expositions interactives afin que ses visiteurs comprennent mieux ce que sont les nanotechnologies. Ces expositions comprennent des moyens audiovisuels, des panneaux éducatifs sur différents thèmes (comme « la toile d'araignée et les nanotechnologies » ou « quelle est ma taille en nanomètres ? »), ainsi que diverses applications des nanotechnologies à la biotechnologie. Ces expérimentations familiarisent le public avec le potentiel illimité du nanomonde tout en lui montrant

aussi certains nouveaux produits, notamment les microrobots. Ces expositions aident le public à mieux comprendre que les rapides avancées des nanotechnologies vont affecter toutes les activités humaines.

Une étude de quatre musées scientifiques parmi les plus renommés du monde a analysé leurs activités visant à l'éducation éthique et la manière dont elles étaient présentées. Ces musées se sont surtout centrés sur les questions éthiques soulevées par les applications des nanotechnologies à la biotechnologie et aux sciences de l'environnement (Choi, 2004).

Tableau 7.1 Thèmes et sujets éthiques présentés dans ces musées

	Biotechn.	Électronique	Médecine	Énergie	Santé	Nanotech.	Astronautique	Alimentation	Agriculture	Techn. digitales
Science Museum, Londres	X	X	X	✓	X	✓	✓	✓	X	X
Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris	X	X	X	X	✓	X	X	✓	✓	✓
Museum of Science, Boston	X	X	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓
Deutsches Museum, Munich	X	X	X	X	✓	✓	X	X	✓	✓

X absents ✓ présents

D'autres technologies, dont les nanotechnologies, n'étaient présentées que de façon rudimentaire et sans les problèmes éthiques qu'elles entraînent. Les musées scientifiques modernes devraient donc jouer désormais un rôle actif pour familiariser le public avec les progrès scientifiques actuels, pour en encourager leur mise en perspective et organiser les débats sur les questions éthiques les concernant.

Le contenu des programmes

Différents types de programmes. Les musées organisent différents types d'événements destinés à informer le public sur des thèmes variés. Des démonstrations, des expositions informatisées en ligne, des panneaux éducatifs, des simulations sont fréquemment proposés sur des thèmes concernant l'éthique. Les musées organisent également des conférences, des animations, des débats et des ateliers. Néanmoins, les musées devraient chercher à concevoir des moyens plus efficaces pour

aider le public à mieux comprendre la relation existant entre la science et l'éthique. Dans les quatre musées précédemment mentionnés, les expositions, panneaux éducatifs et simulations accompagnés ou suivis de conférences sont les types de présentation des questions éthiques les plus fréquents. Tous ces musées possèdent les caractéristiques nécessaires pour familiariser de manière active le public avec la dimension éthique des sciences (Choi, 2004).

Tableau 7.2 Types de présentation des questions éthiques concernant les S&T

	Panneaux	Expositions en ligne	Démonstrations	Conférences	Jeux	Débats	Ateliers	Simulations
Science Museum, Londres	X	X	X	✓	X	X	✓	X
Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris	X	X	X	X	✓	X	X	X
Museum of Science, Boston	X	X	X	X	X	✓	✓	X
Deutsches Museum, Munich	X	X	X	X	✓	✓	X	X

X absents ✓ présents

Adéquation à l'âge des visiteurs. L'âge des personnes visitant des musées est très varié. Étant ouverts à un très large public, ces musées doivent concevoir des activités pouvant susciter l'intérêt de personnes de tous âges et rendre leur visite aussi agréable et intéressante que possible. Les activités destinées aux enfants doivent être d'ordre expérimental afin qu'ils puissent apprendre de manière active, si possible en manipulant eux-mêmes des appareils ou des machines. Les contenus devraient être agréables tout en stimulant et en provoquant la réflexion des visiteurs, par exemple en sélectionnant ce qui correspond le mieux à chaque groupe d'âge. Ainsi, les performances ou les sketches sont plus adéquats pour familiariser les enfants avec certaines questions éthiques, tandis que les conférences et panneaux éducatifs intéressent plus les adultes.

S'interroger soi-même. Les sciences et technologies ne cesseront jamais de progresser. Les questions éthiques ne comprennent pas seulement les problèmes déjà identifiés, mais aussi ceux qui pourraient survenir.

Il est plus important de découvrir quelles questions éthiques peuvent se poser et les différentes réponses qu'elles peuvent recevoir que de trouver la « bonne réponse ». C'est pourquoi l'éducation éthique doit stimuler le questionnement éthique et la recherche de solutions créatives. C'est aussi pourquoi les programmes des musées doivent présenter des points de vue objectifs sur certains problèmes éthiques, tenant compte aussi bien de leurs aspects positifs que de leurs effets négatifs. Il est maintenant de plus en plus souvent proposé aux musées d'élargir leur rôle social et de participer plus activement encore à la formation scientifique du public (Henriksen et Frøland, 2000).

Éducation en ligne

L'éducation en ligne sur les implications éthiques, juridiques et sociales des nanotechnologies peut s'avérer très efficace. Étant donnée l'importance d'Internet aujourd'hui, les résultats obtenus par l'éducation en ligne sont surprenants lorsqu'elle est utilisée de manière efficace et fondée sur un contenu adéquat. Cette approche sert déjà à enseigner d'autres disciplines, notamment la biotechnologie. Le Centre médical de l'université du Kansas possède un Centre de formation à la génétique (GEC) qui, entre autres activités, propose un réseau d'enseignement en ligne du génome (*Human Genome Teacher Networking Project*, HGTNP), financé par le NHGRI. Cet enseignement, centré sur les implications éthiques, juridiques et sociales du génome humain, propose en ligne de nombreuses informations à ce sujet aux étudiants, aux enseignants et au public.

Le Dolan DNA Learning Center des laboratoires Cold Spring Harbor, aux États-Unis, est le premier centre éducatif du monde à avoir offert aux étudiants, aux enseignants et au public un enseignement sur la génétique de manière formelle et informelle. Depuis 1998, il a informatisé toute sa recherche sur l'eugénisme afin de la proposer en ligne au public. Ce service a permis de considérablement mieux comprendre l'importance éthique du respect de la vie privée (Micklos et Carlson, 2000).

L'éducation en ligne contribuera certainement à soutenir l'éducation éthique dans les pays en développement. De nombreux pays, en particulier ces derniers, auraient besoin d'un soutien extérieur pour lancer des programmes destinés à organiser les compétences éthiques des professionnels. En effet, les programmes éthiques des pays en développement manquent d'enseignants qualifiés et de matériels stimulants.

De plus, leurs chercheurs et enseignants ne peuvent que très rarement participer à des événements internationaux qui leur permettraient d'enrichir leurs connaissances. L'éducation en ligne serait donc un bon moyen de surmonter ces obstacles. Internet faisant désormais partie de la vie quotidienne, des réunions organisées dans le cyberspace seraient très efficaces et utiles.

CONCLUSION

Tout en promettant d'importants changements dans nos vies quotidiennes, les technologies peuvent aussi avoir des conséquences ambiguës et générer craintes et soupçons. Les nanotechnologies peuvent offrir des changements positifs, notamment en médecine et dans les soins sanitaires, mais il est encore nécessaire de lancer des discussions publiques sur les avantages et les risques qu'elles comportent si l'on veut que les citoyens en comprennent mieux les effets. Les implications éthiques, juridiques et sociales des nanotechnologies s'étendent à la vie privée et comprennent des questions concernant la sécurité, la métaphysique et l'environnement qui, toutes, requièrent une analyse et des discussions éthiques précises afin de concevoir des directives rigoureuses.

Ce chapitre a examiné diverses questions relevant de l'action publique et de l'éducation. Diverses ressources publiques, notamment les associations et les services scientifiques, peuvent activement contribuer à ce que toutes les parties intéressées prennent conscience des implications éthiques, juridiques et sociales des nanotechnologies. Les ONG ont la capacité d'organiser des « nanodialogues » réunissant des représentants des pouvoirs publics et de l'industrie, des scientifiques, des chercheurs et autres groupes intéressés. Elles peuvent également concevoir des activités destinées à mieux éduquer le public – par des déclarations, présentations, conférences, séminaires, ateliers, expositions et conférences centrées sur un sujet précis – et contribuer ainsi à créer un consensus sur certaines questions.

L'éducation éthique peut être formelle et informelle. L'éducation formelle implique l'enseignement de l'éthique dès le début de l'enseignement primaire et secondaire, puis au niveau universitaire, sous la forme d'unités de valeurs ou d'un enseignement diplômant. Les musées et centres scientifiques ont un rôle majeur à jouer dans l'éducation informelle en renforçant les connaissances du public et en présentant à leurs visiteurs de tous âges les divers aspects éthiques des technologies. La meilleure façon de le faire est de concevoir des contenus

adaptés à chaque classe d'âge, fondés sur des approches interactives appropriées au thème traité – activités manuelles, expositions et jeux de rôle. Les progrès scientifiques et technologiques s'accroissant, les problèmes éthiques font de plus en plus partie des préoccupations de la société moderne, ce qui rend encore plus urgente la formation aux questions éthiques. Les citoyens d'aujourd'hui ont besoin de mieux comprendre les activités scientifiques pour répondre plus efficacement aux nombreuses questions éthiques qu'elles soulèvent (Micklos et Carlson, 2000).

BIBLIOGRAPHIE

- Center for Democracy in Science and Technology (CDST). 2005. *Newsletter*, Nos. 47-54, May-June. <http://cdst.jinbo.net> (en coréen).
- Choi, K. 1996. *STS Education: Understanding and Application*. Seoul : Kyohaksa.
- . 2004. “Developing active role of science museum for educating ethical issues on science and technology”. In : *Journal of Korean Association for Research in Science Education*, Vol. 25, No. 3, 336-345 (en coréen).
- Choi, K. ; Chong, J. ; Chang, H. ; Lee, K. 2005. “Need and significance of STS education at the university level”. In : *Journal of Korean Association for Research in Science Education*, Vol. 25, No. 6, 650-657 (en coréen).
- COMEST (World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology). 2003. *Teaching of Ethics: Second meeting of the COMEST Working Group*. Minutes of the second meeting of the COMEST Working Group on the Teaching of Ethics, Oslo, 10-12 May 2003. Paris : UNESCO. http://portal.unesco.org/shs/en/file_download.php/84cba1f1a29d9d7f68f0a64693e7471eCOMESTEthicsTeachingWG2.pdf (accès 20 décembre 2006)
- Downie, J. R. 1993. “Teaching of bioethics in the higher education of biologists”. In : *Journal of Biological Education*, Vol. 27, 34-38.
- ETC Group. 2003. *The Big Down: From Genomes to Atoms*. Ottawa : ETC Group.
- <http://www.etcgroup.org/upload/publication/104/01/littlebigdown.pdf> (accès 20 décembre 2006)

- . 2004. UK report : *More hits than misses on nanotech*. News release, 29 July. http://www.etcgroup.org/upload/publication/89/01/nr_rsfreport.finaldoc.pdf (accès 20 décembre 2006)
- European Initiative for Biotechnology Education (EIBE). 2002. HYPERLINK «<http://www.eibe.info>» <http://www.eibe.info> (accès 25 janvier 2006)
- Henriksen, E. K. ; Frøland, M. 2000. “The contribution of museums to scientific literacy: Views from audience and museum professionals”. In : *Public Understanding of Science*, Vol. 9, No. 4, 393-415.
- Mays, M. E. (Ed.). 1998. *The Genetics Revolution: Programs and Issues for the Community College*. Washington, DC : Community College Press.
- Micklos, D. ; Carlson, E. 2000. “Engineering American society: The lesson of eugenics”. In : *Nature Reviews*, Vol. 1, 153-158. <http://www.dnalc.org/downloads/naturearticle.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- Mnyusiwalla, A. ; Daar, A. S. ; Singer, P. A. 2003. “Mind the gap’: Science and ethics in nanotechnology”. In : *Nanotechnology*, Vol. 14, R9-R13. <http://www.utoronto.ca/jcb/home/documents/nanotechnology.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- National Centre for Biotechnology Education (NCBE). 2002. *The history of the NCBE*. <http://www.ncbe.reading.ac.uk/NCBE/NCBE/history.html> (accès 20 décembre 2006)
- National Coalition for Health Professional Education in Genetics (NCHPEG). 2002. *The Future is Now*. Fifth Annual NCGPEG/GROW Meeting, Bethesda, Maryland, USA.
- National Human Genome Research Institute (NHGRI). 2001. Ethical, Legal, and Social Implications (ELSI) Research Program. <http://www.genome.gov/10001618> (accès 20 décembre 2006)
- Roco, M. ; Tomellini, R. (Eds.). 2002. *Nanotechnology: Revolutionary Opportunities and Societal Implications*. Report of the Third Joint EC-NSF Workshop on Nanotechnology, in Lecce, Italy, 31 January-1 February 2002. Luxembourg : European Communities.
- ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/nano_lecce_proceedings_05062002.pdf (accès 20 décembre 2006)

- Roco, M. C. 2003. *Government nanotechnology funding: An international outlook*. 30 June. Washington, DC : National Science Foundation.
<http://www.nano.gov/html/res/IntlFundingRoco.htm> (accès 20 décembre 2006)
- Roco, M. C. ; Bainbridge, W. S. (Eds.). 2001. *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Proceedings of a workshop organised by the National Science Foundation, 28-29 September 2000. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Roy, R. ; Waks, L. J. 1985. "The A. B. C.'s of science, technology, society". In : *FORUM*, Vol. 13, No. 4, 1-4.
- Song, J. ; Oh, W. ; Cho, S. ; Koo, S. A. 2002. *Survey and Developing DB System for the Facilities Supporting Students' Out-of-school Science Activities in Korea*. Seoul : Korea Science Foundation.
- The Royal Society & the Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. 29 July. London : The Royal Society & the Royal Academy of Engineering.
<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm> (accès 22 décembre 2006)
- Vazquez-Alonso, A. ; Manassero-Mas, M.-A. 1999. "Response and scoring models for the 'Views on Science-Technology-Society' instrument". In : *International Journal of Science Education*, Vol. 21, No. 3, 231-247.
- Vogel, V. 2001. "Social impacts of nanotechnology in education and medicine". In : Roco, M. C. ; Bainbridge, W. S. (Eds.), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, 143-147. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Wellington, J. 1994. "Using informal learning to enrich science education". In : Wellington, J. ; Henderson, J. ; Lally, V. ; Scaife, J. ; Knutton, S. ; Nott, M. (Eds.), *Secondary Science: Contemporary Issues and Practical Approaches*, 284-294. London : Routledge.

Chapitre 8

ÉVALUATION PRÉCOCE ET DÉCISIONS POLITIQUES

Michèle S. Jean, Édith Deleury et Diane Duquet

L'éthique peut-elle suivre le rythme auquel progresse une nouvelle technologie ? Est-il possible, avant même que de nouveaux produits soient conçus et que les scientifiques en aient déterminé les potentialités, de poser les questions permettant d'en faire l'évaluation éthique ? En 2004, la Commission de l'éthique de la science et de la technologie (CEST) du Québec (*Annexe 1*) a décidé de s'attaquer à ce problème et d'émettre un avis sur les problèmes éthiques relatifs aux nanotechnologies.

Évaluer les problèmes éthiques qu'implique une nouvelle technologie avant que son usage ne se répande présente d'importants avantages. Cela permet de mettre en place le cadre dans lequel ses promoteurs (publics ou privés) pourront veiller à ce qu'elle soit développée de manière responsable. Cette évaluation prospective permettra qu'une nouvelle technologie soit mieux acceptée du grand public grâce au dialogue instauré, dès sa création, entre les différents intéressés. Ce cas reste cependant fort rare et cela explique pourquoi l'éthique est souvent critiquée à cause de son retard sur les progrès scientifiques.

PRÉPARER LE TERRAIN POUR DES ÉVALUATIONS FIABLES

Le fait qu'existent différentes manières d'évaluer l'éthique des nanotechnologies est reconnu. Malgré ces difficultés, la CEST a adopté, du moins pendant une certaine période, la méthode de Preston :

Certains pensent que la nanotechnologie est si différente des autres technologies et ses fondements scientifiques si nouveaux qu'elle requiert un cadre éthique tout à fait différent, spécialement conçu pour les problèmes

qui lui sont propres (Khushf, 2004). Les discussions qui l'entourent sont si orageuses que certains de ceux qui sont conscients de ses implications voudraient concevoir une éthique d'architecture entièrement nouvelle à son sujet. Je ne suis pas d'accord. (Preston, 2005)

La CEST a jugé possible et utile que l'éthique traite de la nanotechnologie en le faisant dès son stade initial, du moins au Québec. C'est pourquoi la CEST a lancé un débat public fondé sur de solides informations afin d'éviter qu'un rejet simpliste de cette technologie résulte de promesses erronées.

La CEST a donc décidé de commencer par rédiger un avis concernant les problèmes éthiques soulevés par la nanotechnologie. Pour ce faire, elle a retenu différents facteurs qu'elle a mis en perspective et évalués en fonction, notamment, de l'intérêt de l'État pour le développement des sciences et des technologies et en raison des investissements de ce dernier dans ce domaine. Elle a également tenu compte de l'attention que les médias accordent à la nanotechnologie, du niveau de compréhension (ou d'incompréhension) du public, de l'attention internationale que ce sujet réclame (investissements, rapports, études, consultations, etc.), de l'impact des informations déjà diffusées sur la société et du bilan des toutes premières conclusions éthiques. L'importance des avantages que cette nouvelle technologie peut offrir a également pesé en faveur d'un examen des problèmes éthiques paraissant lui être inhérents dès son stade initial.

Ensuite, la CEST a identifié les experts qui, dans ce domaine et de concert avec ceux qui y travaillent, possédaient les compétences nécessaires pour faire partie d'un groupe chargé d'examiner les différents aspects qu'il devrait traiter. Ces experts devaient notamment :

- connaître le domaine dans son ensemble (applications, acteurs impliqués) ;
- fournir une vue d'ensemble des directives et orientations existant aux niveaux nationaux et internationaux (stratégies de la gestion des risques, application du principe de précaution, etc.) ;
- dresser l'inventaire de ce qui existe au Québec ;
- déterminer les risques et les avantages pour la santé humaine, l'environnement, l'organisation du travail, la gouvernance, etc. ;
- identifier les valeurs et les questions éthiques menacées ;
- proposer des recommandations.

La CEST a dû tenir compte d'une importante caractéristique des nanosciences et des nanotechnologies pour créer ce groupe de travail – à savoir leur caractère multidisciplinaire qui requiert une collaboration entre biologistes, physiciens, chimistes, chercheurs sur les matériaux et technologues de l'information. À la multidisciplinarité caractérisant ce domaine, il fallait ajouter la diversité de ses applications concernant, par exemple, les secteurs de la santé, l'environnement, l'agriculture, la production alimentaire, l'énergie et la sécurité nationale, y compris les répercussions de ces applications sur l'organisation du travail, la protection des consommateurs et la gouvernance, sans oublier l'avenir de l'humanité et le type de société laissé en héritage aux générations futures (*Annexe 2*). En bref, il fallait que ce groupe comprenne la complexité de ce sujet du point de vue non seulement scientifique, mais encore éthique, social et même économique. Étant donné que, pour être opérationnel, ce type de groupe doit être de taille limitée (pas plus de huit à douze membres), la Commission a distribué à chacun de ces experts des documents sur ce domaine accompagnés d'autres documents fournis par ses membres eux-mêmes au cours de tables rondes et de présentations thématiques auxquelles ont également participé d'autres spécialistes afin de pouvoir traiter ce sujet dans toute sa diversité (*Annexe 3*).

Ce groupe a entrepris cette étude en décembre 2004, pour la conclure en avril 2006. Douze réunions, y compris six tables rondes et présentations, lui ont permis de rédiger un avis et des recommandations qui ont ensuite été soumis à la CEST pour être discutés et adoptés, puis cet avis a été soumis au gouvernement du Québec et diffusé dans le grand public en mai 2006.

Certes, l'on pourrait dire qu'il n'était pas nécessaire d'examiner ces questions, car des études internationales peuvent être utilisées pour évaluer ce domaine, mais ce n'est pas le point de vue de la CEST. En effet, notre Commission s'est attachée à ce que notre pays dans sa totalité, chaque province et chaque communauté soient impliqués de manière active dans ce processus de manière à ce qu'il soit enraciné dans son contexte culturel, social et même économique. Certes, il a fallu tenir compte des données internationales, mais c'est finalement à chaque pays ou province de décider jusqu'où conduire la recherche dans ce domaine, ainsi que des investissements, programmes universitaires, etc. le concernant.

ÉVALUER LES IMPLICATIONS ÉTHIQUES ET SOCIALES DE LA NANOTECHNOLOGIE

S'agissant des conditions dans lesquelles une nouvelle technologie doit se développer, les méthodes d'évaluation des conséquences éthiques et sociales nécessaires pour préparer un avis sont les mêmes, pour l'essentiel, qu'une technologie soit en train de se développer ou encore à son stade initial. Toutefois, il existe d'importantes différences concernant le degré d'incertitude sur la nature des effets (réels ou potentiels) pouvant se manifester. C'est pourquoi ils doivent être examinés en fonction du stade particulier du développement d'une science ou d'une technologie, et du cadre juridique ou administratif existant déjà ou souhaité.

L'approche de la CEST

Le processus d'évaluation adopté par la CEST conjugue la réflexion et le débat éthiques. Il se fonde sur les principes suivants : analyser la situation dans son ensemble, examiner les réalisations et en évaluer les risques (existants ou potentiels) et les avantages, en identifier et analyser les conséquences, déterminer et clarifier les valeurs impliquées, caractériser les conflits de valeurs et les hiérarchiser, puis développer un exposé raisonné afin de justifier les décisions et les recommandations (CEST, 2003, p. 57). C'est cette approche par valeurs sur laquelle se fonde le processus décisionnel et qui justifie les recommandations de la CEST.

Sa mise en pratique de l'évaluation éthique des nanotechnologies

Cette approche a été mise en pratique dès la préparation de l'avis formulé par la CEST sur les nanotechnologies. Dès le départ, la Commission a pris en considération les facteurs suivants :

- La nécessité d'entamer la réflexion et l'évaluation éthiques à la fois en amont des applications nanotechnologiques et en aval, c'est-à-dire tenir compte du travail éthique déjà élaboré.
- La spécificité des nanotechnologies, en raison de :
 - leur taille à la nanoéchelle et donc du manque d'instruments pour observer et manipuler des nanomatériaux ;
 - des propriétés nouvelles et inconnues des matériaux à cette échelle ;

- de la multidisciplinarité (physique, chimie, biologie) de la nanotechnologie et de la convergence des disciplines (en particulier de la biotechnologie, des sciences cognitives et de celles de l'information) qu'elle entraîne ;
- des méthodes de fabrication (en particulier les processus d'agrégation copiés sur la nature) ;
- des différentes tendances existant dans le monde, de la diversité des pratiques et directives existant actuellement, ainsi que des objectifs poursuivis.

Les différentes étapes de cette exploration

Comprendre la situation

(aux niveaux scientifiques, économiques et normatifs)

Le stade initial a consisté à bien saisir toutes les facettes du sujet étudié et à le situer dans le contexte mondial de manière bien documentée. Cette étape a compris différentes activités : passer en revue les publications existant, consulter les experts du groupe de travail tout en leur en adjoignant d'autres grâce à des tables rondes sur plusieurs thèmes tels que la santé, l'environnement, l'organisation du travail, l'économie, la gouvernance, etc. À la fin de cette première étape, la CEST a donné son accord pour que ce groupe d'experts se focalise sur quatre sous-domaines de la nanotechnologie : les nanomatériaux, la nanoélectronique, les nanobiotechnologies et la nanométrie.

Cette étape a également permis de passer en revue les directives visant à orienter le développement technologique et à assurer une protection adéquate des divers acteurs et secteurs d'activités concernés. À cette fin, toutes les conventions, chartes et déclaration sur les droits et libertés, lois et réglementations, directives pratiques, etc. existant alors ont été collectées dans la mesure du possible. Dans le cas des nanotechnologies, il est essentiel d'examiner d'autres instruments qui, tels que le principe de précaution et la viabilité des techniques et produits, sont utiles pour guider les développements des technologies.

Examiner les réalisations et les promesses, déterminer les risques

(réels et potentiels)

Cette étape reposait sur l'examen des publications, sur les consultations avec les experts et l'expertise des membres du groupe de travail. Il s'agissait de déterminer, parmi les applications des nanotechnologies actuellement sur le marché, celles que cette technologie pourrait générer

dans un proche avenir. Étant fondée sur la recherche en cours, cette approche a également servi à définir les risques (réels et potentiels) que les applications de la nanotechnologie, actuelles et envisageables, pourraient entraîner.

Aujourd'hui et pour l'essentiel, les nanotechnologies sont utilisées afin d'améliorer certaines caractéristiques de produits comprenant des écrans solaires, des textiles, le verre, le caoutchouc et l'électronique, ou pour leur donner de nouvelles qualités – par exemple, de la solidité, de la légèreté, de la malléabilité, de l'ininflammabilité et bien d'autres. La santé, l'environnement, l'organisation du travail, le transport et l'électronique sont des domaines pouvant bénéficier des innovations apportées par les nanotechnologies. Il serait donc irresponsable d'ignorer les risques accompagnant la production, la distribution et la mise au rebut de ces nouveaux produits, notamment en ce qui concerne leurs effets potentiels sur l'environnement ou la santé des consommateurs et celle des personnels sanitaires, ainsi que leur capacité de transformer l'être humain en optimisant ses performances intellectuelles ou physiques, ce que certaines applications de la nanotechnologie pourraient rendre possible.

Identifier et analyser les conséquences

Les caractéristiques de cette étape sont la discussion et la recherche d'une documentation (y compris la consultation d'experts si nécessaire) visant à corroborer ou réfuter les avis donnés sur des conséquences actuelles ou qui pourraient ne se manifester qu'à long terme, ainsi que leurs effets actuels et futurs sur la société.

Dans le cas des nanotechnologies, la toxicité des nanoproduits pour la santé et l'environnement est la conséquence qui soulève le plus de craintes. Elles pourraient avoir également d'autres conséquences sur l'organisation du travail, le développement économique (marginalisation des plus démunis), la gouvernance, la protection de la vie privée et la transformation de l'être humain, sans oublier leurs répercussions dans les pays en développement, notamment en accentuant encore l'écart technologique qui les sépare des pays industrialisés.

Déterminer et analyser les valeurs en jeu

Si l'on veut apprécier les conséquences d'une application technologique, il faut en déterminer au moins une valeur éthique qu'il est essentiel de protéger, mais il en existe le plus souvent plusieurs. La discussion permet

de les analyser et de déterminer l'importance que chacun leur accorde par principe et lorsqu'il faut prendre des décisions spécifiques.

La nanotechnologie remet en question de nombreuses valeurs éthiques : la protection de la santé et de l'environnement, la transparence, l'équité, le respect des personnes, de leur intégrité et de leur vie privée, l'exercice de la démocratie et de la responsabilité sociale, l'accessibilité, et bien d'autres encore, mais aussi le développement économique et ses effets visant à améliorer la qualité de la vie de la population. Le développement de la nanotechnologie et de certaines de ses applications respectera-t-il et soutiendra-t-il ces valeurs, ou bien les détruira-t-il ?

Caractériser les hiérarchies et les conflits de valeurs

Notre étude devait comparer les valeurs éthiques dans leur ensemble afin de déterminer celles qui pourraient s'avérer conflictuelles au moment de formuler des recommandations. Par exemple, faudrait-il promouvoir simultanément des valeurs telles que la santé humaine, l'environnement et l'économie, ou bien n'en choisir qu'une risquerait-il de mettre en danger la promotion ou la protection des autres au moment de préciser une recommandation ? Serait-il possible de concilier des valeurs divergentes ? Sur quelles bases concilier des valeurs hiérarchisées ?

Le stade préparatoire de l'avis de la CEST sur les nanotechnologies lui permet de formuler les recommandations concernant les décisions éthiques qui seraient prises au sujet du développement technologique. Cette étape pourrait être enrichie par les résultats des consultations publiques, tout en tenant compte des sujets de l'étude, du temps et des ressources (humaines et financières) disponibles. Ce point sera traité plus loin.

Justifier les décisions et les recommandations par un raisonnement concret

L'essentiel de cette approche s'est fondé sur le raisonnement concret qui caractérise également les deux composants d'une décision éthique : le choix des moyens et celui des fins. Dans la délibération éthique, le choix des moyens doit tenir compte aussi bien de leur efficacité pour atteindre les objectifs désirés que de leur caractère éthique. Le choix des fins ne justifie pas celui des moyens, mais consiste à trouver, pendant que l'on cherche à préciser l'efficacité des moyens, un équilibre supposé être le meilleur entre des valeurs conflictuelles.

Dans un domaine tel que celui de la nanotechnologie et en raison du degré d'incertitude concernant les effets que certaines de ses applications pourraient avoir sur les êtres humains, leur environnement et la société en général, il n'est pas toujours possible de formuler des recommandations concrètes, réalistes et réalisables. Comme l'a fait la CEST en préparant son avis sur les organismes génétiquement modifiés (OGM), il est cependant possible de préparer des « notes de précaution » concernant certaines questions que les responsables gouvernementaux devraient examiner pour prendre des décisions officielles en tenant compte.

CONSULTER LE PUBLIC

Dans un communiqué de presse, l'UNESCO (2003, p. 11) a déclaré :

Les gouvernements des États membres et les législateurs à qui les décisions finales incombent ont d'importantes responsabilités [au sujet de la bioéthique]. Ils doivent donc s'assurer que les citoyens aient pu participer à des débats pluralistes fondés sur des informations valides et tenir compte des différentes écoles de pensée, systèmes de valeurs, contextes culturels et historiques, convictions philosophiques et religieuses de nos différentes sociétés. Il est clair que la bioéthique doit se fonder sur la pratique de la démocratie et la participation active de tous les citoyens.

De plus et à plusieurs reprises, la *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme* encourage les États membres à soutenir et promouvoir le débat public (UNESCO, 2005).

La CEST reconnaît l'importance d'impliquer le public dans le processus démocratique des prises de décision en organisant des consultations et des débats avec lui. Enfin, la CEST a pour mission d'informer le public, de le sensibiliser, d'être à l'écoute de l'opinion publique et d'en tenir compte, de stimuler la réflexion et organiser des débats sur les problèmes et questions éthiques soulevés par les progrès scientifiques et technologiques. La CEST a donc dû trouver les moyens d'être informée de manière précise de l'opinion publique sur le sujet concernant l'avis qu'elle préparait.

Caractéristiques de la consultation du public

Découvrir les valeurs, les principes et les préférences sur lesquels se fonde l'opinion publique constituait l'un des objectifs visés par la CEST en organisant des consultations avec le public. Ces consultations visaient aussi à vérifier si un projet donné répondait aux besoins d'une popula-

tion et à ses intérêts et, si nécessaire, la Commission devait déterminer quelles modifications effectuer et quels cadres juridiques et régulateurs devaient être prévus pour que ce projet obtienne l'assentiment et le soutien du public (CEST, 2004*b*, p. 66).

Dans son tout premier avis, la CEST (2004*b*, p. 64-65) a justifié ainsi la tenue d'une consultation publique :

- Il existe plus de 40 méthodes différentes pour intégrer les citoyens aux prises de décision ; ces méthodes sont déterminées par le sujet traité, l'importance de la question, la forme des résultats souhaitée et l'application éventuelle des résultats.
- Les consultations publiques sont des opportunités exceptionnelles pour débattre de questions éthiques parce que tous les acteurs concernés par la question posée peuvent y participer, ce qui permet d'appréhender les positions et les points de vue dans leur ensemble .
- La nature même des consultations publiques permet d'assurer l'intégrité, la transparence et l'honnêteté des politiques qui en découlent.
- En participant ainsi de manière active au processus décisionnel, les citoyens développent un sentiment d'appartenance à leur communauté et apprennent à rechercher le bien commun plutôt que la satisfaction d'intérêts personnels ; ce processus améliore leur confiance en leur gouvernement et dans le système étatique dans son ensemble.

De plus, lorsque des décisions sont prises à mauvais escient, qu'elles soient peu justifiées ou inutiles (notamment lorsque la décision a été prise d'avance), les consultations publiques entraînent plutôt une perte de confiance de la part des citoyens envers leur gouvernement et leurs institutions, tandis que les pouvoirs publics considèrent que ces consultations sont une perte de temps considérable sous prétexte que les citoyens n'ont ni les capacités, ni les connaissances suffisantes pour discuter de certains sujets avec des experts. La CEST ne partage pas cette opinion, pour autant que la consultation repose sur une information adéquate mise à disposition des citoyens. La Commission réitère l'importance de fournir aux citoyens une information adéquate – claire, neutre et complète – sur les différents aspects du sujet traité et sur les divers problèmes éthiques et sociaux qu'il soulève.

Ce processus impliquant de « rétablir équitablement l'équilibre du pouvoir entre, d'une part, les promoteurs, les experts et les pouvoirs publics qui, dès le début, semblent posséder toutes les connaissances et le pouvoir et, d'autre part, les citoyens qui, certes, disposent de moins de connaissances et de pouvoir mais sont précisément ceux qui subiront les inconvénients des projets en discussion » (Beauchamp, 1991, p. 175), la Commission s'est référée à la transparence caractérisant les règles suivantes pour organiser des consultations publiques (CEST, 2004*b*, p. 68) :

- les règles de procédure doivent être claires et équitables ;
- les personnes qui dirigent la consultation doivent être indépendantes du pouvoir politique ;
- les personnes qui mènent la consultation doivent être dignes de confiance ;
- une information, la plus neutre et la plus objective possible, doit être fournie avant la consultation – une période d'information doit toujours précéder la période d'expression des opinions ;
- des moyens doivent être mis à la disposition des gens qui participent à la consultation pour qu'ils comprennent bien leur rôle et puissent convenablement s'y préparer ;
- la publication d'un rapport doit suivre la consultation, et cela avant même la prise de décision ou la publication d'un rapport sur le sujet ;
- le facteur temps est important pour qu'une consultation se déroule correctement, car la précipitation ne ferait que ruiner le processus.

Contraintes de la consultation publique

Mener à bien une consultation publique n'est pas facile. Cela demande d'importantes ressources humaines et un sérieux investissement. De plus, aucune méthode de consultation n'est parfaite. Chacune a ses faiblesses, qu'il s'agisse du degré auquel la population est représentée, de la pesanteur du processus, de l'utilisation des ressources humaines et budgétaires, ou encore du traitement des données provenant de la consultation et de son suivi. Il en est ainsi de la plupart des méthodes de consultation du public, notamment d'audits publics, de groupes d'intérêt et d'ateliers de toutes sortes, de conférences de citoyens ou d'autres panels.

Afin de réduire ces difficultés et de consulter la population à une échelle à la fois satisfaisante et proportionnée aux moyens disponibles, la CEST a expérimenté divers mécanismes, dont des consultations en ligne ou des forums publics organisés de telle manière que les experts puissent informer un large public pour lui permettre d'améliorer ses connaissances sur le sujet traité, de réagir en posant des questions adéquates et de faire part de ses idées et de ses opinions. En octobre 2005, la CEST a organisé un forum de ce type sur les problèmes éthiques soulevés par l'usage de la biométrie à des fins sécuritaires. Ce forum a réuni quelque 150 participants venus de tous horizons. Avant de préparer un avis, le forum a lancé le débat public en invitant les citoyens à faire part de leur point de vue. Afin de nourrir ce débat, la Commission avait préparé un document informant le public de l'état actuel de cette technologie et du contexte dans lequel elle se développait, puis elle a invité le public à lui soumettre les questions éthiques soulevées par cette technologie. Dans ces deux cas, les résultats obtenus n'ont pas correspondu aux efforts investis. Cela a confirmé qu'il n'est pas facile de convaincre la population de participer à ce type de consultation et d'exprimer son point de vue.

Il semble souvent plus simple d'avoir recours à des sondages pour vérifier le niveau de compréhension qu'une population a d'un sujet donné et pour observer ses réactions à certaines des conséquences qui lui sont présentées. Toutefois, pour la CEST, ces sondages ne répondent pas aux objectifs d'une consultation publique dont le déroulement peut contribuer à améliorer les connaissances et la conscience d'un sujet. Le sondage doit donc être considéré comme un stade préparatoire de la consultation publique qui, après l'analyse des résultats ainsi obtenus, permet de mieux identifier les informations nécessaires, puis de les préciser afin qu'elles bénéficient au processus de la consultation elle-même.

Les nanotechnologies et la consultation publique

Une consultation publique doit être méticuleusement préparée et la date à laquelle elle doit avoir lieu, très soigneusement choisie. Lorsque la CEST a préparé son avis sur les questions éthiques soulevées par les nanotechnologies, il a été décidé qu'il serait inadéquat qu'une consultation publique se tienne avant que cet avis soit publié. En effet, les études les plus récentes concernant les questions soulevées par les nanotechnologies ont été unanimes, qu'elles aient été réalisées au Québec ou

ailleurs au Canada : une large majorité de la population ignore ce qu'est la nanotechnologie ou à quoi elle sert, et n'a aucune idée de la manière dont elle pourrait être à l'avantage des individus et/ou de la société, ni des risques qu'elle présente dès à présent, sans même parler de ses effets sur l'avenir de l'espèce humaine et des futures générations.

L'on ne peut néanmoins passer sous silence l'importance de consulter les citoyens sur le développement d'une technologie pouvant avoir des effets économiques et sociaux comparables à ceux de la révolution industrielle ou à celle de l'information. De plus, et cela sans présumer du contenu des recommandations proposées dans son avis, la Commission était en position de recommander au gouvernement d'organiser une consultation publique à grande échelle sur le développement de la nanotechnologie au Québec, ainsi que sur les questions éthiques la concernant. Cet avis servirait donc à informer la population sur ce sujet avant même de commencer une consultation à laquelle la Commission participerait elle-même.

Ayant pour mission d'informer la population, la CEST a pensé qu'il était important d'atteindre les jeunes, surtout les lycéens et les étudiants. Par exemple, à la suite de son avis sur les banques de données génétiques, la Commission a publié une brochure (CEST, 2004a) visant à rendre ce sujet à la fois plus accessible et en rapport avec les préoccupations de la jeune génération, en utilisant notamment des informations sur les données génétiques. De plus, la CEST a créé une commission de la jeunesse pour préparer un avis sur le plagiat électronique dans les travaux scolaires (www.ethique.gouv.qc.ca/IMG/pdf/avis_plagiat.pdf). Ce projet novateur visait à donner aux jeunes, lycéens et étudiants, la possibilité de participer à la préparation d'un avis à ce sujet en formulant des recommandations à l'intention des décideurs. Leur travail s'est fondé sur un cours d'éthique donné dans le cadre de leurs études sur les questions éthiques en relation avec les applications des sciences et technologies. Ce projet a donné à 15 d'entre eux, sélectionnés par leurs pairs, l'occasion de se familiariser avec le fonctionnement de la CEST. Les étudiants choisis se sont rencontrés pendant un week-end pour discuter du contenu du document présentant l'opinion de la CEST et ses recommandations.

ACCOMPAGNEMENT DES ORGANES DE DÉCISION

Les avis donnés par la CEST font partie de son mandat : consulter, informer, sensibiliser et éduquer le public sur les problèmes éthiques

soulevés par les progrès scientifiques et technologiques. Ses avis doivent également tenir compte d'un autre versant de son mandat : conseiller le public et les responsables des institutions sur les décisions éthiques nécessaires.

Formuler des recommandations

Autant que possible, les avis de la CEST proposent des recommandations destinées aux diverses parties intéressées – gouvernementales, institutionnelles ou autres. Ses recommandations résultent d'une analyse de la situation – élaborée selon une approche scientifique, économique et juridique et combinant une exploration des questions éthiques et sociales concernant les avantages et les risques potentiels que présentent les applications d'une technologie donnée (par exemple la nanotechnologie).

Le CEST s'efforce de respecter un certain nombre de règles lorsqu'elle formule ses recommandations, notamment en précisant les parties auxquelles ces recommandations s'adressent (au niveau gouvernemental ou institutionnel), en faisant des suggestions concernant leur mise en œuvre et en spécifiant les résultats espérés et le calendrier à tenir, si possible.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la CEST formule parfois des « notes de précaution » plutôt que des recommandations, en particulier lorsqu'il est impossible d'identifier la partie à laquelle une recommandation doit être adressée, ou de préciser un objectif particulier, ou bien encore d'identifier les moyens par lesquels obtenir certains résultats. Cela a été le cas, par exemple, de son avis sur les OGM à propos de l'instrumentalisation d'organismes vivants au moyen de la transgénèse : « À la suite de son opinion concernant les effets de la transgénèse sur les représentations culturelles et spirituelles, la Commission estime important qu'une société se dote des moyens d'inverser la tendance actuelle consistant à instrumentaliser des formes de vie afin d'éviter une certaine déshumanisation. » (CEST, 2003, p. 31)

Le cadre politique doit également être pris en considération pour formuler des recommandations, notamment s'agissant de la répartition du pouvoir entre les différents niveaux gouvernementaux (en particulier lorsqu'il s'agit des provinces ou des districts), comme c'est le cas au Québec. Lorsque la Commission pense qu'il est important qu'une recommandation soit mise en pratique, mais qu'elle concerne une juridiction dépassant ses propres compétences et qu'elle ne pourrait donc

pas intervenir, elle formule ses recommandations de telle sorte que le gouvernement de la province du Québec puisse influencer ses contreparties fédérales afin que ces recommandations soient mises en œuvre.

Le « sort » des recommandations

Il est important de souligner qu'une organisation telle que la CEST ne possède aucun pouvoir décisionnel, mais qu'elle peut seulement influencer certaines décisions. Plus l'influence que la Commission exerce sur les pouvoirs publics est grande, plus ses avis seront largement disséminés et mieux ils pourront être discutés avec le public.

Afin d'intervenir au bon moment, il est nécessaire de disposer de mécanismes permettant de suivre l'évolution des politiques gouvernementales et institutionnelles concernant l'avis pour lequel sont préparées des recommandations éthiques. Il peut s'avérer essentiel de rappeler à des commissions parlementaires, par exemple sous la forme d'un mémorandum, certaines recommandations concernant d'importantes questions éthiques afin de mieux en informer leurs membres. Des colloques et activités analogues peuvent aussi constituer des plateformes qui faciliteront la promotion de recommandations sur une question particulière.

Finalement, il peut être utile, si ce n'est essentiel, de contacter certaines des parties concernées par les recommandations formulées dans un avis pour les convaincre de leur importance et de leur intérêt pour le bien commun de la société.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons voulu présenter les difficultés rencontrées pour procéder à une évaluation précoce des implications éthiques d'une technologie en plein développement. Nous avons également essayé d'indiquer les conditions nécessaires pour mettre en œuvre cette activité interdisciplinaire de manière fructueuse, c'est-à-dire de façon qu'elle permette de :

- constituer un cadre représentant l'ensemble des principes ou des valeurs en jeu afin d'évaluer les implications potentielles, éthiques, sociales, environnementales et économiques d'une technologie particulière dans une société donnée ;
- donner toute l'information nécessaire pour qu'un débat public transparent et bien informé puisse se tenir ;

- prévenir des craintes injustifiées en mobilisant l'opinion publique ;
- fournir aux gouvernements (politiciens et pouvoirs publics) certains éléments dont ils devraient tenir compte en formulant leurs politiques.

Enfin, il nous semble important de répéter que la dissémination des connaissances et l'appropriation de ce savoir par la société civile sont les composants essentiels du processus conduisant aux prises de décisions éthiques.

Chaque État doit trouver, en se fondant sur la culture et sur les traditions qui lui sont propres, les moyens les meilleurs pour impliquer ses propres scientifiques et experts dans la discussion éthique, y compris pendant la phase préparatoire de ses recommandations.

BIBLIOGRAPHIE

- Beauchamp, A. 1991. « L'individu, la collectivité et l'éthique : importance de la consultation publique ». Dans : *Cahiers de recherche éthique*, Vol. 15, p. 163-177.
- Commission de l'éthique de la science et de la technologie (CEST). 2003. *Pour une gestion éthique des OGM*. Sainte-Foy, Québec : Commission de l'éthique de la science et de la technologie. <http://www.ethique.gouv.qc.ca/IMG/pdf/CESTAvisOGMfinal.pdf> (accès 10 juin 2007)
- . 2004a. *Les Banques d'Information Génétique : « C'est BIG »*. 2007. <http://www.ethique.gouv.qc.ca/Les-enjeux-ethiques-des-banques-d.html#documents> (accès 10 juin 2007)
- . 2004b. *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique : pour un encadrement démocratique et responsable*. Sainte-Foy, Québec : Commission de l'éthique de la science et de la technologie. <http://www.ethique.gouv.qc.ca/IMG/pdf/AvisBanquesGen.pdf> (accès 10 juin 2007)
- Health Canada. 2000. *The Health Canada Policy Toolkit for Public Involvement in Decision Making*. Ottawa : Health Canada. http://www.hc-sc.gc.ca/ahc-asc/alt_formats/cmcd-dcmc/pdf/public-consult/2000decision_e.pdf (accès 20 décembre 2006)

- Khushf, G. 2004. "The ethics of nanotechnology: Vision and values for a new generation of science and engineering". In : National Academy of Engineering (Ed.), *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering*, 29-55. Washington, DC : National Academies Press.
- Preston C. J. 2005. "The promise and threat of nanotechnology: Can environmental ethics guide us?". In : *HYLE-International Journal for Philosophy and Chemistry*, Vol. 2, No. 1, 19-44. <http://www.hyle.org/journal/issues/11-1/preston.htm> (accès 20 décembre 2006)
- UNESCO. 2003. *Bioethics: International Implications*. Proceedings of the Round Table of Ministers of Science, Paris, 22-23 October 2001. <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001309/130976e.pdf> (accès 20 décembre 2006)
- 2005. *Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme*. Paris : UNESCO. http://portal.unesco.org/en/ev.php-RL_ID=31058&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html (accès 20 décembre 2006)

ANNEXE 1

LA COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE – CEST QUÉBEC (CANADA)

Description de la CEST

La Commission de l'éthique de la science et de la technologie favorise le débat public soutenu par une information pertinente sur toutes les questions éthiques concernant le développement scientifique et technologique et elle fait part de ses propres réflexions sur ces questions sous la forme d'avis, de rapports ou d'études soumis aux divers acteurs du vaste domaine de R&D.

Créée en septembre 2001, la CEST est une initiative du Conseil de la science et de la technologie (CST), comme cela a été prévu dans la politique pour la science et l'innovation intitulée « Savoir pour changer le monde ». La CEST est totalement indépendante, ses liens avec le CST n'étant qu'administratifs.

Principes constitutifs

Les principes suivants ont guidé la création de la Commission de l'éthique de la science et de la technologie (CEST) :

- c'est une plateforme de réflexion et de discussion sur les grandes questions éthiques soulevées par le progrès de la science et de la technologie ;

- c'est un lieu d'élaboration et d'expression des choix collectifs ;
- elle se penche en priorité sur des problèmes nouveaux, non réglés par d'autres dispositifs ;
- elle agit en tant qu'organe d'information et de sensibilisation auprès du grand public, du gouvernement et des milieux spécialisés ;
- elle conseille le gouvernement et les organismes concernés sur les besoins de formation en éthique de la science et de la technologie.

Mission et mandat

Mission

La mission de la CEST consiste, d'une part, à informer, sensibiliser, recevoir des opinions, susciter la réflexion et organiser des débats sur les enjeux éthiques du développement de la science et de la technologie et, d'autre part, à proposer des orientations susceptibles de guider les acteurs concernés dans leurs prises de décision.

Mandat

La CEST s'acquitte de cette mission de la manière suivante :

- Elle définit de sa propre initiative ses objets de réflexion ou répond à une demande émanant du CST ou du ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation ;
- elle réunit l'information pertinente concernant les questions qu'elle aborde à partir de sources nationales et internationales et en diffusant largement cette information par les moyens qu'elle juge appropriés ;
- elle organise des débats publics sur ces enjeux, notamment en organisant des forums, dans le but d'identifier les valeurs propres à la société québécoise et de dégager des consensus ;
- elle prend position sur ces enjeux, notamment sous forme d'avis adressés aux intervenants des domaines de la science et de la technologie, qu'ils soient praticiens, chercheurs, responsables politiques, administrateurs, membres de comités d'éthique de la recherche ou de comités d'éthique clinique ;
- elle conseille le gouvernement et les organismes concernés en matière de besoins de formation éthique de la science et de la technologie ;

- elle présente un rapport annuel de ses activités qui devient partie intégrante du rapport transmis chaque année au ministre ;
- elle établit des liens formels avec des organismes de même vocation dans d'autres pays.

La CEST peut également :

- Développer différents outils et moyens pour informer la population, le gouvernement et tous les milieux intéressés sur les enjeux éthiques du progrès scientifique et technologique ;
- effectuer ou faire effectuer les études et les recherches qu'elle juge utiles ou nécessaires à l'exercice de ses fonctions ;
- former des comités pour l'étude de questions particulières ;
- concevoir et mettre en œuvre les mécanismes appropriés pour consulter la population en général et les spécialistes concernés sur les enjeux éthiques des sujets qu'elle traite ;
- utiliser tous les moyens qu'elle juge appropriés pour diffuser les résultats de son travail – forums, séminaires, sites Web, revues, rapports, avis et études. Les activités d'information et de consultation peuvent se tenir dans la ville de Québec ou à Montréal, mais la CEST accordera une attention particulière aux régions.

Les membres de la CEST

Description

La CEST comprend treize membres et deux membres invités :

- Un/e président/e, également membre de la CEST (nommé/e par le gouvernement) ;
- quatre scientifiques (appartenant aux secteurs de la santé, de la biotechnologie, et de la physique ou TIC), issus du secteur universitaire et du monde industriel ;
- quatre spécialistes de l'éthique (philosophes, éthiciens, juristes, experts en sciences sociales, représentants des principaux mouvements philosophiques ou spirituels) ;
- quatre membres issus des groupes associatifs (comités d'éthique, administrations de santé publique, etc.), des médias, du secteur éducatif ou du grand public ;
- deux administrateurs du secteur public, hôtes invités participant aux réunions et délibérations de la CEST, mais sans droit de vote.

Si nécessaire, la CEST peut s'adjoindre des observateurs en vue d'enrichir ses travaux sur un sujet donné et pendant une certaine période.

Outre le/la président/e, certains membres peuvent être nommés par la CEST pour une durée de trois ans, renouvelable une fois seulement. De même que pour les membres dont c'est le premier mandat, la moitié d'entre eux sont appointés pour une durée de deux ans renouvelable pour trois ans maximum.

Critères de sélection des membres

Les membres de la CEST sont sélectionnés après consultation auprès des milieux spécialisés selon les critères suivants :

- être reconnus comme objectifs et crédibles par leurs pairs ;
- avoir démontré un intérêt et des connaissances incontestables en éthique de la science et de la technologie ;
- faire preuve d'indépendance morale vis-à-vis de l'institution ou de l'organisation à laquelle ils appartiennent.

ANNEXE 2

QUELQUES APPLICATIONS DES NANOTECHNOLOGIES

Industrie automobile et aéronautique : matériaux renforcés par des nanoparticules pour rendre les carrosseries plus légères, pneus recyclables renforcés par des nanoparticules possédant une meilleure adhérence, peinture et verre autonettoyants, plastiques peu coûteux et ininflammables, systèmes de contrôle électroniques, revêtements et textiles pouvant s'autoréparer, catalyseurs.

Électronique et communication : systèmes d'enregistrements universels utilisant des nanorevêtements et des nanofils, écrans plats, technologie sans fil, détecteurs, matériels et processus utilisés dans toutes les technologies de communication et d'information, moyens d'améliorer de mille à des millions de fois la capacité de stocker des données et la vitesse de leur traitement – y compris à un coût inférieur et à une efficacité supérieure à celles des circuits électroniques existant actuellement.

Produits chimiques et matériaux : catalyseurs augmentant l'efficacité énergétique des usines chimiques et améliorant la combustion (diminuant ainsi les émissions polluantes) des moteurs de véhicules, amélioration de la robustesse des pointes de perceuses et d'outils tranchants, lubrifiants et fluides magnétiques « intelligents » pour l'isolement sous vide.

Produits pharmaceutiques, soins sanitaires et sciences de la vie : nouveaux remèdes nanostructurés, systèmes de transport ciblé de gènes

et remèdes vers des parties spécifiques du corps, remplacements biocompatibles de fluides et tissus du corps humain, systèmes d'autodiagnostic à usage domestique, détecteurs pour *labs-on-a-chip* (systèmes intégrant de multiples fonctions sur une seule puce), matériaux facilitant la régénération de tissus osseux et autres.

Industries de transformation : outillages de précision utilisant de nouvelles générations de microscopes et techniques de mesure, de nouveaux processus et outils pour manipuler la matière au niveau atomique, nanopoudres agglomérées dans des matières brutes dont les propriétés particulières comprennent la capacité de détecter des défauts latents et de les réparer, nanoparticules destinées au polissage chimicomécanique, auto-assemblages moléculaires, matériaux inspirés de processus biologiques naturels et de biostructures.

Production d'énergie : nouveaux types de batteries, photosynthèse artificielle pour produire de l'énergie propre, puits quantiques pour cellules solaires, stockage sécurisé de l'hydrogène utilisé comme énergie propre, économies d'énergie grâce à des matériaux plus légers et des circuits réduits, revêtements nanostructurés, catalyseurs.

Exploration spatiale : vaisseaux spatiaux plus légers, production d'énergie et système de consommation d'énergie plus économique, systèmes robotiques miniaturisés et ultraperformants.

Environnement : membranes sélectives filtrant le sel, des agents infectieux et autres contaminants, pièges nanostructurés destinés à nettoyer les polluants d'effluents industriels, caractérisation des effets des nanostructures dans l'environnement, maintenance industrielle à long terme optimisée par la réduction de l'usure des matériels et de la consommation d'énergie, réduction des sources de pollution, amélioration des techniques de recyclage.

Sécurité nationale : détection et neutralisation d'agents chimiques et biologiques, efficacité accrue des circuits électroniques, revêtements et matériaux nanostructurés plus résistants, matériels de camouflage, textiles légers et pouvant s'autoréparer, sang artificiel, systèmes de surveillance miniaturisés.

ANNEXE 3

LE GROUPE DE LA CEST TRAVAILLANT SUR LA NANOTECHNOLOGIE

Sabin Boily, ingénieur physicien, spécialiste dans le domaine des nanotechnologies, président du comité, membre de la CEST

François A. Auger, directeur, Laboratoire d'organogénèse expérimentale (LOEX) du CHAUQ, hôpital du Saint-Sacrement

David Carter, ministre de l'Environnement du Québec

Sylvain Cofsky, directeur de l'innovation et des grandes entreprises, NanoQuébec

Éric David, professeur, l'École de technologie supérieure, membre de la chaire de recherche en matériaux et équipements de protection utilisés en santé et sécurité au travail IRSST/ÉTS

Édith Deleury, juriste, université Laval, présidente, CEST

André Doré, représentant de la population intéressé par la nanotechnologie

Denis Godbout, Office québécois de la langue française, observateur et conseiller linguistique

Peter Grütter, université McGill, département de physique, directeur scientifique de NanoPic, service de l'innovation en nanosciences et nanotechnologies du Conseil du Canada de recherche en sciences naturelles et en génie (NSERC)

Benoît Gagnon, chercheur à la chaire Raoul-Dandurand en études stratégiques de l'université du Québec à Montréal, assistant, membre de la CEST

Mark Hunyadi, professeur de philosophie et d'éthique appliquée, université Laval

Michèle S. Jean, historienne, université de Montréal, présidente du CIB de l'UNESCO, membre de la CEST

Benoît Lussier, physicien, ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, observateur

Teodor Veres, Conseil national de recherches du Canada (CNRC), chef du groupe sur les nanomatériaux fonctionnels

Membres du secrétariat de la Commission

Emmanuelle Trottier, conseillère en bioéthique, secrétaire du comité (recherche et projets)

Diane Duquet, coordinatrice de la CEST (recherche et supervision des projets)

Tables rondes et présentations organisées

Présentation sur le domaine des nanotechnologies ;

Aspects biotechnologiques des nanotechnologies ;

Aspects environnementaux des nanotechnologies ;

Le processus de l'évaluation éthique ; le principe de précaution ;

L'entreprise, les règles de sécurité et les régulations ;

Le développement durable et l'analyse du cycle de vie.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFM	Microscope à force atomique (<i>atomic force microscope</i>)
ALECSO	Organisation arabe pour l'éducation, la culture et les sciences
AMM	Association médicale mondiale
APCEIU	Centre Asie-Pacifique d'éducation pour la compréhension internationale (Asia-Pacific Centre of Education for International Understanding)
BSCS	Curriculum des études en sciences biologiques
CEST	Commission de l'éthique de la science et de la technologie (Québec, Canada)
CIB	Comité international de bioéthique, UNESCO
CNT	Nanotubes de carbone
COMEST	Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies
DOE	Département de l'énergie
EIBE	Initiative européenne pour une éducation aux biotechnologies
ELSI	Implications éthiques, juridiques et sociales
ETC Group	Groupe d'action sur l'érosion, la technologie et la concentration des polluants (Action Group on Erosion, Technology and Concentration)
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

FDA	Food and Drug Administration, États-Unis
FIV	Fécondation <i>in vitro</i>
GEC	Centre de formation à la génétique (Genetics Education Center)
GenEd	<i>Genome Education</i>
GEObs	Observatoire mondial d'éthique
HCDH	Haut-Commissariat des Nations Unies aux droits de l'homme
HGP	<i>Human Genome Project</i>
HGTNP	Réseau d'enseignement en ligne du génome (<i>Human Genome Teacher Networking Project</i>)
HRTEM	Microscope à transmission électronique de haute résolution (<i>High Resolution Transmission Electron Microscopy</i>)
IRM	Imagerie par résonance magnétique
LCD	Écran à cristaux liquides (<i>liquid crystal display</i>)
LED	Diodes émettant de la lumière (<i>light emitting diode</i>)
MEMS	Systèmes microélectromécaniques (<i>microelectromechanical systems</i>)
NEG	Nanotech Engagement Group
NHGRI	Institut national de recherche sur le génome humain (National Human Genome Research Institute)
NIDG	Groupe pour le dialogue sur les nanotechnologies (Nanotechnologies Issues Dialogue Group)
NIH	Instituts nationaux de la santé (<i>National Institutes of Health</i>)
NSF	National Science Foundation
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OGM	Organisme génétiquement modifié
OIT	Organisation internationale du Travail
OMD	Objectifs du Millénaire pour le développement
OMPI	Organisation mondiale de la propriété intellectuelle
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONG	Organisation non gouvernementale
OST	Observatoire des sciences et des technologies, Royaume-Uni (Office of Science and Technology)
PCR	Réaction en chaîne polymérase (<i>Polymerase Chain Reaction</i>)
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement

PSPD	Solidarité populaire pour la démocratie participative (People's Solidarity for Participatory Democracy)
R&D	Recherche et développement
RFID	Radio-identification (<i>Radio Frequency Identification</i>)
SANi	Initiative de l'Afrique du Sud pour les nanotechnologies (<i>South African Nanotechnology initiative</i>)
SCCNFP	Comité scientifique des produits cosmétiques et des produits non alimentaires destinés aux consommateurs (Scientific Committee on Cosmetic and Non-food Products)
SEM	Microscope à balayage (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
SPM	Microscope à champ proche (<i>Scanning Probe Microscope</i>)
S&T	Sciences et technologies
STM	Microscope à effet tunnel (<i>Scanning Tunnelling Microscope</i>)
STS	Sciences, technologies et société (Science-Technology-Society)
SWNT	Nanotube monofeuillet (<i>Single-walled nanotube</i>)
TEM	Microscope à transmission électronique (<i>Transmission Electron Microscope</i>)
TIC	Technologie de l'information et de la communication
TWAS	Académie des sciences pour le monde en développement (ancienne Académie des sciences du tiers monde)
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

INDEX

- AAN, American Academy of Nanomedicine, 110
- AATF, African Agricultural Technology Foundation, 188, 195
- ADN, 58, 59, 68, 71, 72, 73, 80, 90, 97, 111, 113, 116, 126, 137, 140, 143, 157, 181, 209
- AFM, microscope à force atomique, 68, 70, 74, 75
- Afrique,
Commission nationale de recherche sur l'eau, 184,
Nouveau Partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD), 194,
SANi, Initiative de l'Afrique du Sud pour les nanotechnologies (South African Nanotechnology initiative), 184
- ALECSO, Organisation arabe pour l'éducation, la culture et la science, 16
- Alzheimer, maladie d', 123, 144, 157
- Annan, K., 189, 195
- Anthropomorphisation de la technologie, 132 – Voir aussi Artefacts
- APCEIU (Asia-Pacific Centre of Education for International Understanding), Centre Asie-Pacifique d'éducation pour la compréhension internationale, 202
- Applied Professional Ethics Center/ Centre d'éthique professionnelle appliquée, 209
- Approche ascendante (bottom-up), 43
- Approche descendante (top-down), 72
- Artefacts, 132
- Assainissement, dépollution, 145, 175, 178
- Assemblage positionnel, 76, 77
- Association pour l'éthique pratique et professionnelle de Bloomington, 212
- Attapulgitte, 179
- Australie,
Département national de l'industrie, des sciences et des ressources, 206
- Autodiagnostic, 97, 244
- Automédication, 97
- Avicenne, Prix Avicenne d'éthique scientifique, 25
- Banaras, université hindoue de, 183
- Banque mondiale, 145, 183

- barrière hémato-encéphalique (BHE), 142
- The Big Down/La grande déprime, 203
- Bioélectronique, 119, 120, 127
- Bioéthique, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 35, 141, 144, 145, 148, 158, 164, 168, 206, 209, 210, 211, 213, 230, 238, 246
- Biomédical, biomédecine, 97, 181
– Voir aussi Nanomédecine
- Biomimétique, 71, 73, 79, 175
- Bionanotechnologie, 56, 69, 70, 73, 200 – Voir aussi Nanomédecine
- Biopolymères, 58, 59
- Biotechnologie, 8, 32, 59, 90, 91, 92, 109, 172, 189, 196, 202, 208, 209, 210, 213, 215, 216, 218, 227, 241
- Boîtes noires, 97
- Brésil,
Conseil national pour le développement scientifique et technologique, 183,
Initiative nationale brésilienne en nanotechnologie, 183,
Ministère de la Science et de la Technologie, 183,
programme brésilien sur la nanotechnologie, 51
- BSCS (Biological Sciences Curriculum Study), Curriculum des études en sciences biologiques, 209
- Buckminster Fuller, R., 43, 89, 90
– Voir aussi Fullerène
- Buckyball, 44, 67, 80, 83, 144, 175
– Voir aussi Fullerène
- Caltech,
Institut de technologie de Californie, 42
- Canada,
programme canadien de recherche sur le génome et la santé dans le monde, 172 – Voir aussi CEST,
Commission de l'éthique de la science et de la technologie
- Cancer, 51, 111, 115, 134, 147, 157, 175
- Cantilever, 68
- Catalyse,
catalyseur, 64, 99, 184, 185
- Cellules souches,
technologie des, 28, 29, 32, 137, 138, 189
- Centre de nanosciences de l'université de Cambridge, 206
- Cerveau humain,
(interfaces entre le cerveau humain et l'ordinateur), 96, 120, 127, 133, 139
- CEST,
Commission de l'éthique de la science et de la technologie, 11, 36, 223, 237, 239, 247
- Chimique,
synthèse, 64, 67, 76, 89, 92, 93, 94, 99, 142
- Chine,
Académie des sciences, 12, 180,
Centre de technologie du nanomètre, 180,
Centre pour la recherche des lois scientifiques, 210,
Comité national directeur pour les nanosciences et les nanotechnologies, 180,
Ministère de la Science et de la Technologie, 180, 183,
Shenzhen Chengying High-Tech, 181,
Université de Tsinghua, 181
- Chirurgie esthétique, 97, 119, 120, 121, 124, 125
- Chromophores synthétiques, 74
- Clinton, B., 204
- clonage, 24, 25, 209
- clottocytes, 117
- Cold Spring Harbor, Laboratory, 218
- Colvin, V., 139

- COMEST,
 (Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies), 7, 14, 35, 207, 247,
 mandat de la, 8, 15, 35, 234, 235, 240, 242
- Comité consultatif d'experts sur l'enseignement de l'éthique, 22
- Comité interagences des Nations Unies sur la bioéthique, 16
- Comité international de bioéthique (CIB), 14, 15, 35
- Commission des Nations Unies sur le secteur privé et le développement, 192
- Conférence mondiale sur la science et l'utilisation du savoir scientifique, 21, 206
- Connaissance/s,
 économie, 51, 79, 81, 93, 98, 102, 105, 227, 229,
 société, 8, 15, 17, 18, 24, 28, 29, 32, 49, 75, 92, 96, 102, 104, 105, 106, 110, 129, 130, 131, 139, 146, 148, 151, 153, 156, 160, 161, 171, 188, 189, 194, 200, 201, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 210, 215, 220, 224, 225, 228, 230, 234, 235, 236, 237, 240, 249,
 transfert, 101, 104, 179, 187, 206
- Constance du jardinier, 18
- Coopération,
 internationale, 7, 9, 13, 15, 16, 17, 19, 24, 30, 34, 35, 102, 110, 146, 172, 181, 191, 194, 202, 224, 247, 248
- Corée, République de, 11, 25, 33, 51, 81, 180, 199, 201, 208, 210, 215,
 Commission coréenne pour l'UNESCO, 202,
 musée national des Sciences, 215,
 People's Science Center, 202,
 Science-Technology-Society, 202, 222, 249,
 Syndicat coréen des enseignants et éducateurs, 202
- Corps (humain), 45, 75, 116, 120, 126, 203, 244,
 commercialisation, 17, 126 – Voir aussi Amélioration et Chirurgie esthétique,
 confusion, 124 – Voir aussi Identité personnelle,
 cybergisation, 120, 127, 131,
 implants et la prothétique, 74,
 propriété, 29 – Voir aussi Autonomie et Humain et Identité personnelle,
 technologie, 126, 138, 203
- CranesSci MEMS Lab, 182
- Crichton, M., 45, 53, 83, 121
- Daar, A., 5, 11, 25, 167, 171, 174, 195, 196, 197, 198, 221
- Dabur (Dabur Research Foundation), 182
- Débat,
 dialogue, 7, 9, 15, 35, 194, 201, 205, 223, 248
- Déclaration internationale sur les données génétiques humaines, 19
- Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme, 19, 22, 23, 28, 141, 144, 145, 148, 158, 164, 168, 230, 238
- Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme, 19
- Défis mondiaux, 190
- Dekker, C., 65, 84
- dendrimères, 58, 61, 114, 175
- Département de génétique de l'université de Washington, 209
- Dépollution, assainissement, 64, 175
- Deutsches Museum, Munich, 215, 216, 217
- développement, pays en, 8, 14, 17, 19, 23, 36, 41, 51, 81, 93, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 146, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179,

- 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 207, 218, 228, éducation en ligne, 218, 219, R&D en nanotechnologie, 105, 204, risques des nanotechnologies, 205, terrains d'essais, 8
- dialogue, 7, 9, 15, 35, 194, 201, 205, 223, 248, interdisciplinaire, 9, 34, international et coopération en éthique, 19, 22, 24, 146, 172
- Dialogue mondial sur la nanotechnologie et les populations pauvres de l'Institut Meridian, 193
- diaspora scientifique, 192, 193
- Dolan DNA Learning Center, 218
- Drexler, E., 43, 45, 53, 90, 107, 111, 116, 121, 122, 130, 131, 133, 134, 139, 165, 167
- eau, utilisation et gestion, 8, 15, 30, 61, 62, 66, 105, 145, 146, 173, 175, 178, 179, 181, 183, 189 – Voir aussi Filtres et Assainissement, dépollution
- écart, 30, 81, 82, 123 – Voir aussi nanodivision du monde, des connaissances, 8, 81, économique, 33, 50, 53, 81, 102, 146, technologique, 82, 100, 101, technologique, 161, 228
- éducation, 214, du public en science et technologie, 106, 151, 199, 202, 206, 208, 212, dupublic en science et technologie, 210, éthique - pour scientifiques, 17, 20, 21, 22, 52, 216, nanoéducation, 50, 183
- effets, impact des nanotechnologies, 8, du développement scientifique et technique, 8, 9, 14, 15, 21, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 51, 56, 57, 60, 69, 82, 88, 93, 99, 100, 102, 105, 114, 122, 127, 129, 143, 153, 158, 159, 164, 171, 174, 184, 185, 186, 189, 190, 193, 200, 201, 203, 204, 205, 218, 219, 226, 228, 229, 230, 234, 235, 244
- ELSI, Ethical, Legal and Social Implications, 209, 212, 213, 221, 247 – Voir aussi Implications éthiques, juridiques et sociales
- Énergie, 216
- Engage: Stem Cells, 189
- Engines of Creation, 43, 53, 107, 133 – Voir aussi Drexler
- Environnement, 244, accidents, 24, 34, menaces, 96, 142, risques, 48, 93, 94, 103, 142, 143, 144, 161, 186, 188, 189, 193, 194, 201, 205, 219, 224, 226, 227, 228, 234, 235, dégradation, 9, 175, dépollution, 61, éthique, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 49, 52, 56, 87, 92, 96, 98, 101, 103, 105, 106, 109, 118, 123, 138, 140, 151, 159, 161, 164, 189, 199, 200, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 216, 217, 218, 219, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 234, 237, 239, 240, 241, 242, 246, 247, 248, pollution, 99, 144, 165, 244, protection, 24, 37, 51, 96, 137, 143, 144, 181, 187, 225, 227, 228, 229, 245, sécurité, 26, 27, 32, 34, 51, 56, 67, 82, 90, 94, 110, 143, 144, 159, 203, 204, 219, 225, 245, 246
- épitaxie, 42, 59
- érythrocytes (globules rouges), 117
- Espace, 8, 15, 68, 72, 119, 214, éthique, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13,

- 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 49, 52, 56, 87, 92, 96, 98, 101, 103, 105, 106, 109, 118, 123, 138, 140, 151, 159, 161, 164, 189, 199, 200, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 216, 217, 218, 219, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 234, 237, 239, 240, 241, 242, 246, 247, 248, exploration et technologies spatiales, 7, 15, 16
- ETC Group (Groupe d'action sur l'érosion, la technologie et la concentration des polluants), 140, 143, 158, 165, 185, 196, 202, 203, 204, 206, 220, 247
- Ethics and Politics of Nanotechnology, 33, 36, 37, 108, 134, 165, 166, 168, 209, 220
- Éthique, 5, 137, analyse, 7, 9, 21, 23, 25, 28, 29, 30, 49, 51, 65, 67, 71, 88, 110, 118, 150, 151, 152, 153, 155, 156, 161, 174, 203, 209, 211, 219, 233, 235, 246, appliquée, 16, 20, 23, 27, 28, 32, 58, 62, 73, 101, 123, 209, 211, 246, capacités, 17, 19, 43, 46, 56, 75, 90, 96, 97, 104, 105, 121, 123, 125, 127, 128, 129, 130, 139, 148, 155, 189, 193, 231, comités, 18, 19, 20, 23, 35, 159, 240, 241, conscience, 162, 201, 207, 219, 233, directives et des règles, 29, éducation, enseignement, 2, 5, 13, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 33, 52, 101, 106, 151, 161, 176, 183, 199, 202, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 216, 218, 219, 247, 248, 249, environnement, 7, 9, 15, 20, 23, 24, 31, 32, 41, 51, 61, 63, 93, 109, 124, 139, 140, 142, 143, 144, 173, 176, 177, 186, 187, 189, 200, 201, 204, 214, 216, 219, 224, 225, 227, 228, 229, 230, 244, évaluation, 8, 20, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 49, 53, 102, 106, 122, 123, 138, 143, 159, 172, 174, 223, 226, 236, 246, gouvernement, 82, 180, 181, 183, 185, 192, 200, 202, 204, 205, 206, 225, 231, 234, 236, 240, 241, implications, 8, 13, 15, 17, 34, 35, 49, 87, 108, 133, 200, 203, 204, 206, 209, 213, 215, 218, 219, 224, 236, infrastructures, 17, 18, 19, 181, internationale, 7, 9, 13, 15, 16, 17, 19, 24, 30, 34, 35, 102, 110, 146, 172, 181, 191, 194, 202, 224, 247, 248, observatoire, Observatoire mondial d'éthique (GEObs), 17, 20, principes, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 29, 34, 82, 98, 106, 119, 130, 141, 149, 204, 226, 230, 236, 239, problèmes, questions, 5, 7, 9, 13, 15, 16, 17, 19, 21, 23, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 48, 49, 50, 65, 75, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 97, 98, 102, 105, 109, 118, 127, 128, 133, 137, 138, 140, 141, 148, 154, 156, 159, 160, 161, 172, 187, 189, 193, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 223, 224, 225, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 239, 240, 241, prospective, 8, 13, 26, 30, 32, 35, 118, 133, 223, public, 5, 7, 9, 15, 18, 24, 25, 34, 35, 36, 48, 87, 93, 96, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 131, 156, 187, 188, 189, 194, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 209,

- 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 223, 224, 225, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 241,
réflexion, 8, 9, 13, 14, 19, 27, 32, 34, 35, 118, 133, 140, 162, 164, 194, 199, 202, 205, 211, 215, 217, 226, 230, 239, 240,
responsabilité, 14, 15, 21, 95, 97, 103, 126, 164, 187, 195, 206, 229,
valeurs, 8, 14, 18, 26, 27, 29, 30, 32, 35, 90, 96, 207, 219, 224, 226, 228, 229, 230, 236, 240
- Europe, 16, 18, 48, 90, 199, 211,
Commission européenne, 16, 208,
Conseil de l'Europe, 16,
Initiative européenne pour une éducation aux biotechnologies (EIBE), 208, 209, 221, 247,
Sixième programme-cadre (PC6) de coopération scientifique et technologique avec des pays tiers partenaires de l'Union européenne, 191,
Union européenne, 182, 191, 200, 213
- FAO, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 16, 247
- FDA, Food and Drug Administration, États-Unis Feynman, R. P., 143, 248
- FIB (Focus Ion Beam machines), machines à bombardement ionique, 68
- Foresight Institute's Nanotechnology Challenges, 194
- Foucault, M., 28
- Foundation for the NIH/
Bill and Melinda Gates Foundation's Grand Challenges in Global Health / Fondation pour les grands défis de la santé mondiale, 110, 134, 190, 248
- Freitas, R., 111, 117, 118, 120, 133, 139, 158, 166
- Fuite des cerveaux, 192, 193 – Voir aussi Diaspora scientifique
- GEC, Genetics Education Center, 218, 248
- GenEd, Genome Education, 213, 248
- Génétique, 237 – Voir aussi Nanotechnologie,
diagnostic, 71, 111, 112, 118, 123, 124, 138, 147, 175, 177, 182, 190, 203,
organismes génétiquement modifiés, 188, 189, 230,
profil, 122, 140, 151, 153, 154, 155, 156,
thérapie, 73, 111, 113, 115, 119, 123
- Génie, 91,
génétique, 19, 29, 91, 92, 110, 112, 113, 123, 137, 138, 140, 141, 142, 144, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 160, 161, 164, 209, 212, 215, 218, 237, 248,
tissus, 91, 114, 115, 117, 119, 124, 126, 137, 158, 183, 184, 186, 244
- GEObs, Observatoire mondial d'éthique, 20, 23, 248
- Gouvernance, 101,
des technologies, 5, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 45, 50, 51, 52, 66, 67, 71, 73, 75, 78, 80, 81, 88, 95, 97, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 118, 119, 133, 137, 138, 140, 141, 142, 146, 158, 171, 172, 181, 182, 187, 188, 189, 194, 195, 197, 199, 200, 201, 202, 204, 206, 207, 208, 213, 214, 215, 216, 217, 219, 223, 224, 227, 234, 243, 247, 248, 249 – Voir aussi Directives, Normes, Règles, Réglementations, Standards
- Grey goo, 121, 139

- Groupe de travail sur l'enseignement de l'éthique, 21
- GSLC, Genetics Science Learning Center, 213
- Habermas, J., 28
- Haier, 181
- Hassan, M., 179, 193, 196
- HCDH, Haut-Commissariat des Nations Unies aux droits de l'homme, 16, 248
- HGSRGC (Human Genome Research Genesis Center), Centre de recherche sur le génome humain, 213
- HGTNP (Human Genome Research Genesis Center), Centre de recherche sur le génome humain, 218, 248
- HSBCP, High School Bioethics Curriculum Project, 209
- Humain et êtres humains, 8, 13, 14, 19, 20, 24, 87, 95, 118, 120, 121, 127, 131, 132, 133, 137, 141, 144, 146, 149, 150, 152, 155, 160, 162, 172, 189, 195, 209, 212, 213, 218, 230, 248, condition et technologie, 25, 75, 93, 146, cybergisation, 120, 127, 131, dignité, 13, 14, 24, 137, 138, 146, 148, 160, 164, 214, génome, 13, 14, 19, 137, 149, 150, 152, 155, 172, 189, 195, 209, 212, 213, 218, 248, point de vue réductionniste, 8, 15, 21, 27, 35, 87, 88, 92, 93, 94, 118, 158, 163, 225, 233, séquençage du génome humain, 111, 137
- Huntingdon, maladie de, 153
- Illich, I., 28
- Imagerie par résonance magnétique (IRM), 65, 70, 74, 248
- Immunisation, vaccination, 190, herd immunity, 147
- Implants, prosthétique, 66, 74, 120 – Voir aussi Cerveau humain
- Implications éthiques, juridiques et sociales, 17, 18, 19, 103, 107, 108, 149, 150, 167, 197, 209, 211, 212, 213, 215, 218, 219, 221, 222, 231, 238, 247
- Inde, Académie Shanmugha des arts, des sciences, des technologies et de la recherche (Shanmugha Arts, Science, Technology and Research Academy), 182, Conseil de la recherche scientifique et technique (Council for Scientific and Industrial Research), 166, 182, 244, Département des sciences et des technologies, 181, initiative pour les sciences et technologies de nanomatériaux, 181, Institut des structures et systèmes des matériaux intelligents (Institute of Smart Materials Structures and Systems), 182, Institut indien des sciences (Indian Institute of Science), 182, Institut indien des technologies (Indian Institute of Technology), 182, Institut Nimbkar de recherche agricole (Nimbkar Agricultural Research Institute, NARI), 183, Institut Saha de physique nucléaire, 182, Panacea Biotec, 182, programme national de nanotechnologie, 181, programme national pour les matériaux intelligents, 181, université de Delhi, 182
- Inégalité / inéquité, des charges et des avantages, 17, 28, 46, 65, 73, 79, 81, 113, 123,

- 129, 152, 174, 177, 185, 186, 187, 188, 189, 192, 194, 201, 205, 206, 215, 219, 223, 224, 226, 235 – Voir aussi Pays en développement et Justice
- Institut d'études politiques de l'université East Anglia (Policy Studies Institute at East Anglia University, Royaume-Uni), 206
- Institut Kennedy d'éthique (Kennedy Institute of Ethics, université de Georgetown), 209
- InterAcademy Council (Conseil interacadémique), 194
- Intracellulaire, engins, 70, imagerie, 46, 65, 70, 71, 74, processus, 23, 27, 31, 46, 51, 52, 59, 61, 64, 66, 69, 70, 72, 74, 75, 77, 78, 92, 94, 99, 112, 119, 126, 131, 132, 147, 149, 152, 186, 194, 225, 226, 227, 230, 231, 232, 233, 237, 243, 244, 246
- Iran, République islamique d', 25, 82
- Joy, B., 121, 134
- Justice, 165
- lab-on-a-chip (système intégrant de multiples fonctions de laboratoire sur une seule puce), 71, 175, 177
- lithographie, 77, 78, 94 – Voir aussi Nanolithographie
- Livre blanc, Département de la santé (Royaume-Uni), 152
- malnutrition, 178
- Martin, P., 191, 195, 196, 197
- médicalisation, 128, 129
- Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, 115
- MEMS, systèmes microélectromécaniques, 91, 181, 182, 183, 248
- Meridian, Institut, 194
- métrologie, 50, 52, 67
- Mexique, 8, 25, 51, 180, 184, Conseil national scientifique et technologique, 184, Institut national d'astrophysique, d'optique et d'électronique, 185, Laboratoire national des nanotechnologies, 185
- microbivores, 117
- militaire, 96, 105, 187, applications des nanotechnologies, 160, 172, 174, 189, 201, 215, 216, 227, escalade, 96
- Mnyusiwalla, A., 221
- mondialisation, 102
- Motorola, 64, 65, 84, 185
- Museum of Science, Boston, 216, 217
- nanoapplications, 48
- Nano Biotech Ltd, 182
- nanobiotechnologie, 203
- nanocomposites, 62, 63, 181, 184, 185
- nanocoquilles d'or, 114, 115
- nanodiplomatie, 195
- nanodiscussions, 203
- nanodivision du monde, 33, 34, 146
- nanoéducation, 50
- nanoélectronique, 56, 58, 66, 74, 109, 185, 227
- nanoéthique, 32, 208
- nanofabrication, 65, 66, 69, 72, 83
- nanofibres, 63
- nanofils, 57, 58, 59, 72, 185, 243
- naoingénierie, 141
- Nano Jury UK, 190
- nanolithographie, 47
- nanomachines, 45, 73, 109, 111, 116, 117, 118, 121, 131, 133, 147, 183, 203, artificielles, 74, 116, 117, 124, 125, médicales, 14, 27, 34, 56, 71, 93, 97, 98, 110, 111, 116, 117, 120, 139, 140, 175, naturelles ou biologiques, 24, 31, 46, 55, 60, 69, 70, 71, 72, 74, 89, 93, 96, 99, 116, 119, 125, 144, 147, 150, 202, 209, 210, 244, 245, 247
- nanomagnétiques (particules), 179

- nanomanipulation, 47
- nanomatériaux, 31, 32, 50, 56, 57, 58, 62, 63, 64, 66, 67, 82, 94, 111, 139, 140, 143, 144, 177, 180, 181, 182, 186, 187, 205, 226, 227, 246, effets sur l'environnement, 186, 189, leur différence d'avec les matériaux bruts, 68, 79, 124, 132, 142, 160, 163, 171, ressources matérielles, 98, 99, 100, 102, risques pour la santé humaine, 31, 32, 56, 138, 142, 201, 224, 229 – Voir aussi Nanomédecine
- Nanomédecine, 5, 56, 70, 97, 109, 110, 113, 118, 121, 122, 123, 126, 130, 131, 132, 133, 139, 205, diagnostic, 71, 111, 112, 118, 123, 124, 138, 147, 175, 177, 182, 190, 203
- nanométrie, 53, 56, 69, 227 – Voir aussi métrologie
- nanomonde, 45, 47, 50, 199, 215
- nanomoteurs, 116
- nano-oignons, 66
- nanoparticules, 58, 60, 61, 63, 64, 66, 67, 71, 76, 91, 93, 94, 103, 105, 112, 114, 115, 122, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 147, 157, 158, 159, 175, 177, 182, 183, 184, 186, 205, 243, 244
- nanoproduits, 51, 179, 228
- nanorobots, 45, 90, 139, 158
- nanoscience, 31, 41, 47, 53, 70, 83, 108, 180, 204, et nanotechnologies, 5, 7, 8, 9, 16, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 48, 50, 51, 82, 87, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 111, 121, 141, 142, 146, 154, 159, 160, 164, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 212, 213, 215, 216, 218, 219, 223, 225, 226, 227, 228, 229, 233, 245, 246, 248, 249, caractère multi- et interdisciplinaire, 50, contrôle, 42, 57, 66, 71, 73, 75, 78, 93, 94, 95, 96, 103, 111, 119, 121, 147, 155, 156, 160, 164, 172, 173, 175, 182, 184, 187, 188, 199, 243, effets, 8, 9, 15, 21, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 51, 56, 57, 60, 69, 82, 88, 93, 99, 100, 102, 105, 114, 122, 127, 129, 143, 153, 158, 159, 164, 171, 174, 184, 185, 186, 189, 190, 193, 200, 201, 203, 204, 205, 218, 219, 226, 228, 229, 230, 234, 235, 244, état actuel des, 35, éthique, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 212, 213, 215, 216, 218, 219, 223, 225, 226, 227, 228, 229, 233, 245, 246, 248, 249
- nanosubstance, 90
- nanotechnologies, pays en développement, 8, 14, 17, 19, 36, 41, 51, 81, 88, 93, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 146, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 218, 228
- nanotechnologie, définition, 31, 32, 41, 42, 55, 87, 89, 90, 91, 92, 109, 160, 163, 173, 192
- nanotechnologies, 5, 7, 8, 9, 16, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 48, 50, 51, 82, 87, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 111, 121, 141, 142, 146, 154, 159, 160, 164, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 212, 213, 215, 216, 218, 219, 223, 225, 226, 227, 228, 229, 233, 245, 246, 248, 249, caractère multi- et interdisciplinaire, 50, contrôle, 42, 57, 66, 71, 73, 75, 78, 93, 94, 95, 96, 103, 111, 119, 121, 147, 155, 156, 160, 164, 172, 173, 175, 182, 184, 187, 188, 199, 243, effets, 8, 9, 15, 21, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 51, 56, 57, 60, 69, 82, 88, 93, 99, 100, 102, 105, 114, 122, 127, 129, 143, 153, 158, 159, 164, 171, 174, 184, 185, 186, 189, 190, 193, 200, 201, 203, 204, 205, 218, 219, 226, 228, 229, 230, 234, 235, 244, état actuel des, 35, éthique, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13,

- 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 41, 49, 52, 56, 87, 92, 96, 98, 101, 103, 105, 106, 109, 118, 123, 138, 140, 151, 159, 161, 164, 189, 199, 200, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 216, 217, 218, 219, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 234, 237, 239, 240, 241, 242, 246, 247, 248, pays en développement, 8, 14, 17, 19, 36, 41, 51, 81, 88, 93, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 146, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 218, 228 – Voir aussi Pays en développement, questions éthiques, 5, 7, 9, 15, 16, 17, 19, 23, 26, 27, 30, 32, 33, 35, 49, 75, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 97, 98, 102, 109, 118, 137, 140, 141, 159, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 224, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 239, R&D, 76, 94, 95, 96, 100, 102, 104, 105, 106, 171, 179, 180, 182, 183, 186, 187, 191, 192, 194, 199, 203, 204, 205, 239, 249, santé publique, 104, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 154, 155, 186, 241 – Voir aussi Nanomatériaux, risques pour la santé humaine et Nanomédecine, surveillance sanitaire des populations, 149
- Nanotech Port, Shenzhen, 181
- nanothérapie, radiothérapie nanométrique, 115
- nanotube, 44, 45, 47, 48, 54, 57, 58, 59, 63, 64, 65, 66, 69, 72, 79, 82, 83, 84, 99, 116, 142, 157, 175, 177, 180, 181, 183, 185, 186, 205, 215, 249
- nanovéhicules, 79
- NARI (Nimbkar Agricultural Research Institute), Institut Nimbkar de recherche agricole, 183, 196 – Voir aussi Inde
- National Academy of Sciences, 133, 197
- National Science Foundation, NSF, 200, 204, 221, 248
- NCBE (National Centre for Biotechnology Education), Royaume-Uni, 209, 210, 221
- NEPAD, Nouveau Partenariat pour le développement de l’Afrique, 194
- NHGRI (National Human Genome Research Institute), 209, 218, 221, 248
- NIDG (Nanotechnologies Issues Dialogue Group), 205, 248
- NNI (National Nanotechnology Initiative), Initiative nationale en nanotechnologie, États-Unis, 109
- normalité, 141, 161
- normes, 14, 17, 18, 19, 23, 94, 102, 106, 123, 149, 187, 207, communes, 14, 18, 89, 90 – Voir aussi Gouvernance des technologies et Directives
- NSTC (National Science and Technology Commission), Commission nationale pour les sciences et les technologies, États-Unis, 204, sous-comité sur la nanoéchelle, la science, l’ingénierie et la technologie, 204
- OCDE, Organisation de coopération et de développement économiques, 16, 32, 248
- OIT, Organisation internationale du Travail, 16, 248
- OMD, Objectifs du Millénaire pour le développement, 174, 175, 192, 248
- OMPI, Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 16, 248

- OMS, Organisation mondiale de la santé, 16, 248
- ONG, Organisations non gouvernementales, 25, 183, 188, 201, 202, 206, 219, 248
- opacités patentes, 187
- organes, 17, 24, 34, 119, 124, 126, 157, 159, 187, 209 – Voir aussi Transplantation d'
- OST (Office of Science and Technology), Observatoire des sciences et des technologies, Royaume-Uni, 206, 248
- Parkinson, maladie de, 75
- participation du public, 204
- Participation du public – Voir aussi normes, standards)
- pays en développement, 8, 14, 17, 19, 36, 41, 51, 81, 88, 93, 98, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 146, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 218, 228
- PCR, réaction en chaîne polymérase, 150, 248
- personne, personnel, 14, 29, 55, 56, 104, 110, 127, 128, 129, 130, 138, 141, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 160, 162, 163, 203, autonomie, 27, 28, 29, 127, 148, 164 – Voir aussi Principe du respect de l'autonomie, identité, 14, 127, 128, 159 – Voir aussi Corps et Confusion au sujet du corps
- phagocytes, 117, 134
- pharmaceutique, industrie, 97
- pharmacogénétique, 137
- pharmacogénomique, 153
- pincés optiques, 67, 68, 70, 74, 77
- politique, 1, 3, 7, 11, 12, 14, 30, 97, 106, 173, 179, 191, 192, 194, 195, 214, 232, 235, 239 – Voir aussi Gouvernance des technologies et Directives, normes, standards
- post-humanité, 132
- pouvoirs publics, 7, 9, 15, 16, 17, 18, 24, 27, 34, 35, 36, 188, 189, 212, 219, 231, 232, 236, 237
- Powell, C., 194, 195, 197
- précision, ingénierie de, 77, 78
- Preston, C. J., 223, 224, 238
- Principes, de précaution, 15, 103, 202, 204, 224, 227, 230, 235, 246, du respect de l'autonomie, 27, 28, 29, 127, 148, 164, équité, 15, 23, 88, 93, 104, 146, 229, éthiques, 5, 7, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 48, 49, 75, 82, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 109, 110, 118, 121, 124, 131, 137, 140, 141, 148, 149, 150, 154, 159, 160, 161, 171, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 223, 224, 226, 229, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 241, 247, moraux, 17, 27, 28, 35, 103, universels, 19, 243, viabilité, 22, 174, 227
- produits pour le bien-être, 98
- Projet sur le génome humain (High School Human Genome Project), 209
- propriété intellectuelle, 16, 100, 102, 104, 181, 183, 187, 212, 248, droits de, 13, 16, 19, 22, 23, 24, 28, 100, 102, 104, 141, 144, 145, 148, 149, 158, 164, 168, 181, 183, 187, 202, 211, 212, 214, 230, 238, 248 – Voir aussi Inégalités et Nanotechnologies

- protéines, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 140, 144, 147, 175, 177
- PSPD (People's Solidarity for Participatory Democracy), Solidarité populaire pour la démocratie participative, 202, 249
- Public, débat, 16, 18, 25, 29, 36, 106, 109, 118, 140, 161, 190, 203, 209, 224, 226, 230, 233, 236, 239 – Voir aussi Dialogue
- quantique, 46, 91, 92, 93, 112, 181, fils, puits et trous quantiques, 42, 43, 46, 59, 226, 230, 244, incertitude, 46, 226, 230
- rationalité fonctionnelle, 34
- réaction en chaîne polymérase, PCR, 150
- recyclables, 98, 243
- réglementations, 82, 101, 143, 161, 193, 227 – Voir aussi Normes, Standards, internationales, 14, 16, 25, 33, 96, 101, 104, 143, 187, 191, 225, 240
- remède, 49, 74, 114, 115, découverte, 42, 44, 45, 49, 58, 60, 74, 137, 162, 190, transport ciblé, 69, 71, 73, 97, 113, 114, 115, 147, 157, 178, 180, 182, 183, 184, 185, 190, 228, 243
- respirocytes, 117, 158
- responsabilité en S&T, 13, 14, 15, 21, 24, 95, 97, 103, 126, 127, 164, 187, 195, 206, 229, 230 – Voir aussi Éthique et responsabilité et Directives, normes
- RFID, radio-identification, 95, 249
- Rice University's Center for Biological and Environmental Technology / Centre de nanotechnologie biologique et environnementale, 139
- Roadmap's Nanomedicine Initiative, 110
- Royal Society and Royal Academy of Engineering, Royaume-Uni, 31, 41, 77, 88, 143, 147, 204, 205
- Saha Institute of Nuclear Physics, 182 – Voir Inde
- SANi (South African Nanotechnology initiative), Initiative de l'Afrique du Sud pour les nanotechnologies, 184, 249
- santé publique, 104, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 154, 155, 186, 241 – Voir aussi Nanomatériaux, risques pour la santé humaine et Nanomédecine
- savoir, savoir scientifique, 21, 186, 206, 210, société, 8, 15, 17, 18, 24, 28, 29, 32, 49, 75, 92, 96, 102, 104, 105, 106, 110, 129, 130, 131, 139, 146, 148, 151, 153, 156, 160, 161, 171, 188, 189, 194, 200, 201, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 210, 215, 220, 224, 225, 228, 230, 234, 235, 236, 237, 240, 249
- SCCNFP (Scientific Committee on Cosmetic and Non-food Products), Comité scientifique des produits cosmétiques et des produits non alimentaires destinés aux consommateurs, 143, 167, 249
- science-fiction, 87, 90, 91, 95, 96, 97, 99, 102, 106, 121, 122, 139
- Sciencewise Grand Scheme, Royaume-Uni, 206
- semi-conducteur, roadmap, 57, 58, 59, 60, 66, 72, 77, 78, 79, 91, 92, 99, 177, 182
- SEM, microscope à balayage de sonde, 67, 249
- Sheremeta, L., 150, 167
- Singer, P., 5, 12, 145, 146, 162, 167, 168, 171, 179, 191, 192, 195, 196, 197, 198, 221

- Sixième programme-cadre (PC6)
de coopération scientifique et
technologique avec des pays
tiers partenaires de l'Union
européenne, 191
- Smalley, R. E., 43, 44, 45, 54, 122,
134
- société de l'information, 15,
effets sociaux du génie de la
génétique humaine, 190, 203
- sol-gel, techniques, 64, 65
- Somerville, M. A., 25
- Sommet mondial sur le développement
durable, 173, 206
- SPM, microscope à champ
proche, 45, 46, 47, 48, 49, 68, 70,
77, 91, 249
- standards, 19, 69, 103 – Voir
aussi normes
- STM, microscope à effet tunnel, 42,
45, 46, 68, 75, 249
- Sun Microsystems, entreprise
privée, 121
- surveillance sanitaire des
populations, 149
- Taniguchi, N., 31, 43, 54
- technologies, 5, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 15,
16, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 26,
27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35,
36, 41, 45, 50, 51, 52, 66, 67, 71, 73,
75, 78, 80, 81, 88, 95, 97, 98, 100,
101, 102, 104, 105, 106, 118, 119,
133, 137, 138, 140, 141, 142, 146,
158, 171, 172, 181, 182, 187, 188,
189, 194, 195, 197, 199, 200, 201,
202, 204, 206, 207, 208, 213, 214,
215, 216, 217, 219, 223, 224, 227,
234, 243, 247, 248, 249,
analyse économique, 30,
anthropomorphisation, 132,
conception large, étroite, 26, 27,
28, 32, 41, 75, 87, 106, 116, 121,
130, 131, 132, 173, 194, 195,
écart technologique, 101, 228,
effets, 8, 9, 15, 21, 24, 26, 27, 30,
31, 32, 51, 56, 57, 60, 69, 82, 88,
93, 99, 100, 102, 105, 114, 122,
127, 129, 143, 153, 158, 159, 164,
171, 174, 184, 185, 186, 189, 190,
193, 200, 201, 203, 204, 205, 218,
219, 226, 228, 229, 230, 234, 235,
244,
et éthique, 1, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 12,
13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22,
23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32,
33, 34, 35, 36, 41, 49, 52, 56, 87,
92, 96, 98, 101, 103, 105, 106, 109,
118, 123, 138, 140, 151, 159, 161,
164, 189, 199, 200, 203, 204, 205,
206, 207, 208, 209, 210, 211, 212,
213, 214, 216, 217, 218, 219, 223,
224, 225, 226, 228, 229, 234, 237,
239, 240, 241, 242, 246, 247, 248,
et valeurs, 8, 14, 18, 26, 27, 29, 30,
32, 35, 90, 96, 207, 219, 224, 226,
228, 229, 230, 236, 240,
évaluation, 8, 20, 26, 27, 28, 29,
30, 32, 33, 34, 49, 53, 102, 106,
122, 123, 138, 143, 159, 172, 174,
223, 226, 236, 246,
technologies capacitanes, 95,
transfert technologique, 101, 187
- TEM, microscope à transmission
électronique, 67, 75, 249
- Tourette, syndrome de la, 163
- transhumaniste, vision de l'être
humain, 130
- transmission électronique, 67, 248,
249
- transplantation d'organes, 24
- troisième Symposium latino-américain
sur le SPM, 48
- troubles de déficit de l'attention par
hyperactivité, 163
- tuberculose, 177
- UNESCO,
activités en éthique des S&T, 8,
13, 14, 16, 17, 23, 91, 94, 127, 147,
163, 172, 179, 180, 183, 191, 201,
203, 204, 209, 210, 211, 215, 216,

- 217, 218, 219, 220, 227, 236, 241,
 centre de partage d'information et
 de documentation sur l'éthique des
 sciences et des technologies, 13,
 chaire de bioéthique à Haïfa,
 Israël, 22,
 Division de l'éthique des sciences
 et des technologies, 12, 15, 21, 24,
 programme d'éthique, 14
 université de Tsinghua, 181 – Voir
 aussi Chine
- US-Vietnam Joint Committee
 for Science & Technology
 Cooperation, 191
- valeurs, 8, 14, 18, 26, 27, 29, 30, 32,
 35, 90, 96, 207, 219, 224, 226, 228,
 229, 230, 236, 240, 256, 263,
 éthiques, 5, 7, 8, 9, 13, 15, 16, 17,
 18, 19, 20, 21, 23, 26, 27, 28, 29,
 30, 32, 33, 34, 35, 36, 48, 49, 75,
 82, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93,
 94, 95, 97, 98, 100, 101, 102, 103,
 104, 105, 106, 109, 110, 118, 121,
 124, 131, 137, 140, 141, 148, 149,
 150, 154, 159, 160, 161, 171, 199,
 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206,
 207, 208, 209, 211, 212, 213, 214,
 215, 216, 217, 218, 219, 220, 223,
 224, 226, 229, 230, 231, 233, 234,
 235, 236, 237, 239, 240, 241, 247,
 254, 257, 260, 261
- van der Waals, interactions de, 59
 VIH/sida, 111, 145, 176, 177, 182,
 184, 195
 Viktor, E., 45, 54
 Vogel, V., 203, 222
 WaterEngage, 189
 West, J., 112, 113, 114, 115, 135, 140
 Wiesner, M., 140
 Witty Ticky Ray, 163
 zéolites, 178, 179

La recherche dans le secteur des technologies aux niveaux atomique et moléculaire avance à vive allure dans le monde entier. Leurs applications prometteuses en médecine, dans l'industrie et dans la communication vont du développement de nouveaux médicaments et outils de diagnostic à des dépolluants ou des antipolluants, en passant par la production de matériaux très solides et légers et par les méthodes révolutionnaires de stockage, de récupération et de dissémination de l'information.

L'opinion publique sur les nanotechnologies est divisée entre les espoirs suscités par leurs bénéfiques potentiels et les craintes à propos de leurs éventuels effets nocifs sur l'environnement et l'être humain. Face à ce clivage, *Nanotechnologies, éthique et politique* s'engage dans une réflexion éthique prospective inédite : Quels sont les problèmes de santé et d'environnement résultant de l'utilisation des nouveaux matériaux produits par des technologies à l'échelle du nanomètre ? Comment les dispositifs à nanoéchelle peuvent-ils être contrôlés et quelles sont les inquiétudes qui pèsent sur les applications militaires et biomédicales des nanotechnologies ? Quelles opportunités ces technologies peuvent-elles apporter à la coopération internationale consacrée aux besoins les plus urgents des pays en développement ?

Ce volume réunit quatorze experts du monde entier – des conseillers de la Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (COMEST) – qui discutent des avancées technologiques en nanotechnologie, examinent les polémiques entourant sa définition et explorent des questions éthiques et politiques liées. Leur objectif est de stimuler un dialogue interdisciplinaire fécond sur les technologies à nanoéchelle parmi les scientifiques, les spécialistes de l'éthique, les décideurs, les groupes d'intérêt et le grand public.

www.unesco.org/publishing



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

Secteur des sciences
sociales et humaines

Division de l'Éthique
des sciences et
des technologies

ISBN 978-92-3-204051-0



9 789232 040510