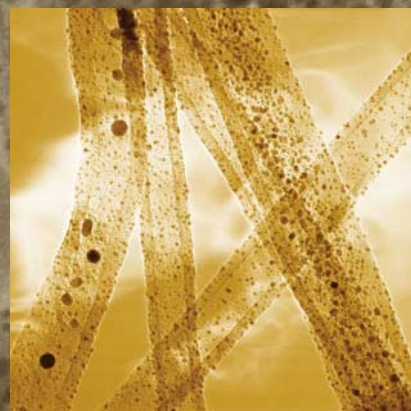
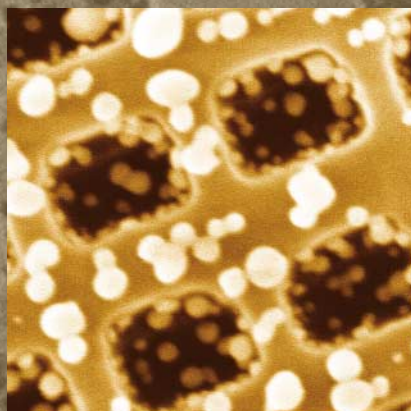
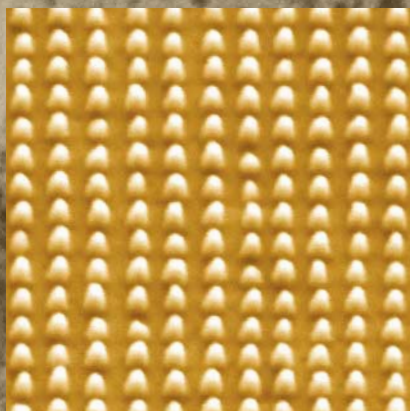


Éthique et nanotechnologies :



se donner les moyens d'agir

Éthique et nanotechnologies :
se donner les moyens d'agir

A V I S

Éthique et nanotechnologies : se donner les moyens d'agir

Commission de l'éthique de la science et de la technologie

1200, route de l'Église
3^e étage, bureau 3.45
Québec (Québec)
G1V 4Z2

En soutien à la réalisation de l'Avis

Coordination et supervision

Diane Duquet

Secrétaire de réunion

Emmanuelle Trottier

Recherche et rédaction

Emmanuelle Trottier et Diane Duquet, avec la collaboration d'appoint de Marco Blouin

Soutien technique

Documentation

Monique Blouin

Communication et supervision de l'édition

Katerine Hamel

Révision linguistique

Le Graphe

Conception graphique de la couverture

Normand Bastien

Avec le soutien financier de la Société pour la promotion
de la science et de la technologie

Conception et mise en pages

Éditions MultiMondes

Impression

K2 Impressions

Avis adopté à la 25^e réunion de la Commission de l'éthique de la science et de la technologie
le 14 juin 2006

© Gouvernement du Québec 2006

Dépôt légal: 4^e trimestre 2006

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

ISBN-10: 2-550-47480-5

ISBN-13: 978-2-550-47480-7

Pour faciliter la lecture du texte, le genre masculin est utilisé sans aucune intention discriminatoire.

Les membres du Comité de travail

SABIN BOILY, président

Consultant Valorisation-Innovation
Membre de la CEST

D^R FRANÇOIS A. AUGER

Département de chirurgie
Université Laval
Directeur du Laboratoire d'organogenèse
expérimentale (LOEX)

DAVID CARTER

Conseiller scientifique en biotechnologie
Ministère du Développement durable,
de l'Environnement et des Parcs (Québec)

SYLVAIN COFSKY

Directeur développement industriel et régional
NanoQuébec

ÉRIC DAVID

Département de génie mécanique
École de technologie supérieure
Chaire de recherche en matériaux et équipements
de protection utilisés en santé et sécurité au travail
IRSST/ÉTS

ÉDITH DELEURY

Présidente de la CEST
Faculté de droit
Université Laval

ANDRÉ DORÉ*

Retraité de l'enseignement

BENOÎT GAGNON

Chaire Raoul-Dandurand en études stratégiques
et diplomatiques à l'UQÀM
Membre de la CEST

PETER GRÜTTER

Département de physique
Université McGill
Directeur scientifique de NanoPic (CRSNG)

MARK HUNYADI

Faculté de philosophie
Université Laval

MICHÈLE S. JEAN

Centre de recherche en droit public
Université de Montréal
Présidente de la Commission canadienne
pour l'UNESCO
Membre de la CEST

TEODOR VERES

Chef de groupe
Nanomatériaux fonctionnels
Conseil national de recherches Canada

OBSERVATEURS:

BENOÎT LUSSIER

Conseiller en technologies stratégiques –
nanotechnologies
Ministère du Développement économique,
de l'Innovation et de l'Exportation (Québec)

DENIS GODBOUT

Terminologue
Office québécois de la langue française

DU SECRÉTARIAT DE LA COMMISSION

Diane Duquet, coordonnatrice de la CEST

Emmanuelle Trottier, conseillère en éthique

* Précision apportée à la demande de M. André Doré, en date du 11 mars 2006: « Compte tenu du caractère historiquement nord-américain de l'activité économique du Québec et de son mode de "gouvernance rationnelle", je tiens à dire que la science et l'acceptation par les marchés devront être les deux premiers critères à respecter dans l'élaboration de toute réglementation du secteur des nanotechnologies. »

Novembre 2006

Monsieur Raymond Bachand
Ministre du Développement économique,
de l'Innovation et de l'Exportation
710, place D'Youville, 6^e étage
Québec (Québec) G1R 4Y4

Monsieur le Ministre,

Je vous transmets par la présente la version finale de l'avis intitulé *Éthique et nanotechnologies : se donner les moyens d'agir*, préparé par la Commission de l'éthique de la science et de la technologie.

Espérant le tout à votre entière satisfaction, je vous prie d'accepter, Monsieur le Ministre, l'expression de ma haute considération.

La présidente,

Marie-France Germain

Novembre 2006

Madame Marie-France Germain
Présidente
Conseil de la science et de la technologie
1200, route de l'Église
3^e étage, bureau 3.45
Québec (Québec) G1V 4Z2

Madame la Présidente,

C'est avec plaisir que je vous remets l'Avis au ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation intitulé *Éthique et nanotechnologies : se donner les moyens d'agir*.

Je vous prie de recevoir, Madame la Présidente, mes salutations distinguées.

La présidente de la Commission de l'éthique
de la science et de la technologie,

Édith Deleury

Table des matières

Liste des sigles et acronymes.....	xvii
Résumé, recommandations et commentaires.....	xix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 – UN NOUVEAU MONDE EN ÉMERGENCE: L'UNIVERS DES NANOTECHNOLOGIES	5
Un monde à découvrir	5
Nanoscience et nanotechnologie: l'échelle du nanomètre	7
Aspects marquants à considérer: une prémisse au questionnement éthique	8
La taille d'un composant nanométrique.....	8
Les propriétés nouvelles de la matière nanométrique.....	8
La manipulation de la matière.....	9
La multidisciplinarité et la convergence disciplinaire	10
Un engouement généralisé.....	10
Les grands secteurs d'intervention	12
Les nanomatériaux.....	12
La nanoélectronique.....	13
La nanobiotechnologie et la nanomédecine	14
La nanométrologie	14
Des attentes et des préoccupations à considérer	15
Un aperçu des bénéfices escomptés.....	15
Dans le domaine de la santé.....	15
Dans le domaine de l'environnement	17
Dans le domaine des technologies de l'information	18
Dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation	19
Entre la fiction et la réalité.....	19
L'autoréplication de nanorobots et l'écophagie globale.....	20
Des promesses parfois irréalistes	21
Des questions à soulever, des valeurs à privilégier	21

CHAPITRE 2 – REGARD SUR LES MODALITÉS D'ENCADREMENT DU SECTEUR	25
Le risque et les nanotechnologies	25
La nature des risques à considérer	26
Les modalités d'évaluation et de gestion du risque : quelques constats et interrogations	27
L'encadrement actuel	28
Lois et règlements canadiens	29
Lois et règlements québécois	30
Instruments internationaux	31
En soutien à l'industrie	32
Des approches responsables pour composer avec le risque	33
Le principe de précaution	33
Quelques mises au point	34
Des mesures pour l'action	36
L'approche « cycle de vie » dans la perspective du développement durable	38
CHAPITRE 3 – NANOTECHNOLOGIES : PRÉOCCUPATIONS D'ORDRE ÉTHIQUE	41
Des exigences fondamentales comme prémisses	41
La nécessité d'établir une terminologie et une nomenclature scientifiques communes	41
L'importance de mettre sur pied des procédures et des standards	42
La poursuite de la recherche et la diffusion des résultats	43
Préoccupations éthiques associées aux produits issus des nanotechnologies	44
En matière de santé humaine	44
Santé et sécurité	44
<i>La protection des travailleurs</i>	44
<i>La protection de la population</i>	47
Les applications dans le domaine de la santé	48
<i>L'éthique de la recherche biomédicale</i>	49
<i>Diagnostics et applications thérapeutiques</i>	50
En matière d'environnement	51
En matière de sécurité	53
Dans le domaine militaire	53
<i>Quelques exemples d'applications « nanomilitaires »</i>	54
<i>Un aperçu des préoccupations éthiques</i>	55
Dans la société civile	56

Des préoccupations associées à la convergence des connaissances et des technologies	57
L'identité humaine dans un contexte d'optimisation des performances	57
Le rapport de l'être humain avec la nature	59
Préoccupations éthiques non exclusives aux nanotechnologies.....	60
En lien avec la gouvernance.....	60
La légitimité et la transparence du processus décisionnel.....	61
Les mesures d'encadrement et de reddition de comptes.....	63
En lien avec l'activité économique liée aux nanotechnologies	64
Les choix éthiques dans le développement de l'activité économique liée aux nanotechnologies au Québec.....	64
Le fossé nanotechnologique dans le contexte de la mondialisation des marchés.....	65
<i>L'orientation de la R-D nanotechnologique</i>	65
<i>La possession de l'expertise en nanotechnologies</i>	66
La propriété intellectuelle et la gestion des brevets	66
La collecte de renseignements personnels.....	68
En lien avec la citoyenneté et l'innovation technologique	70
CONCLUSION	73
Glossaire	75
Bibliographie.....	83
Sites suggérés.....	107
Annexes	
Annexe 1 : Quelques exemples d'applications des nanotechnologies.....	111
Annexe 2 : Aperçu prospectif d'applications des nanotechnologies.....	113
Annexe 3 : Questionnement relatif aux divers enjeux des nanotechnologies	117
Les activités de consultation et d'information de la Commission	119
Les membres de la Commission de l'éthique de la science et de la technologie	121

Liste des sigles et acronymes

ACV	Analyse du cycle de vie
ADN	Acide désoxyribonucléique
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (Québec)
CCST	Conseil consultatif des sciences et de la technologie (Canada)
CCSTPM/PMACST	Conseil consultatif des sciences et de la technologie du Premier ministre/Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (Canada)
CIRAIG	Centre interuniversitaire de référence sur l'analyse, l'interprétation et la gestion du cycle de vie des produits, procédés et services (Québec)
COMEST	Commission mondiale d'éthique des connaissances scientifiques et des technologies (UNESCO)
CRSNG/NSERC	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada/Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail (Québec)
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (États-Unis)
DDT	Dichlorodiphényltrichloréthane
EPA	Environmental Protection Agency (États-Unis)
EPTC	Énoncé de politique des trois conseils subventionnaires fédéraux canadiens
ESAA	Environmental Services Association of Alberta (Canada)
FDA	Food and Drug Administration (États-Unis)
FQRNT	Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies
FQRSC	Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture
FRSQ	Fonds de la recherche en santé du Québec
GE³LS	Genomics: Ethics, Environment, Economics, Law, and Society
ICON	International Council on Nanotechnology
IRM	Imagerie par résonance magnétique
IRSC	Instituts de recherche en santé du Canada
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (Québec)
ISO	Organisation internationale de normalisation
LED	Diode électroluminescente
NANOPIC	Plate-forme d'innovation du CRSNG en nanoscience et en nanotechnologie
NBIC	Nanotechnology, biology, information technology and cognitive science (en référence à la convergence de la nanotechnologie, de la biologie, des technologies de l'information et des sciences cognitives)

NE³LS	Nanotechnology: Ethics, Environment, Economics, Law and Society
NIH	National Institutes of Health (États-Unis)
NIST	National Institute of Standard and Technology (États-Unis)
NNI	National Nanotechnology Initiative (États-Unis)
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale (Nations Unies)
OCDE/OECD	Organisation de coopération et de développement économiques (Organisation for Economic Co-operation and Development)
OGM	Organisme génétiquement modifié
ONU	Organisation des Nations Unies
OQLF	Office québécois de la langue française
PEBBLE	Probes Encapsulated by Biologically Localized Embedding
PME	Petites et moyennes entreprises
PNB	Produit national brut
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
R-D	Recherche et développement
RFID	Identification par radio-fréquence (Radio Frequency Identification)
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (États-Unis)
SIMDUT	Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (Canada)
SOLAS	Safety of Life at Sea
SPM	Microscopie en champ proche
STM	Microscopie à effet tunnel
TDHA/ADHD	Trouble déficitaire d'attention avec hyperactivité (Attention Deficit Hyperactivity Disorder)
TIC	Technologies de l'information et de la communication
UICN	Union mondiale pour la nature
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine
WWF	Organisation mondiale de protection de l'environnement

Résumé, recommandations et commentaires

Née de la convergence des recherches fondamentales en physique, en chimie et en biologie, la nanotechnologie est souvent présentée comme l'une des technologies les plus prometteuses pour l'avenir de l'humanité. Son caractère novateur, son passage amorcé du laboratoire à la fabrication industrielle et à la commercialisation, l'importance des investissements publics et privés dans son développement et dans sa promotion ainsi que les retombées attendues sont autant d'éléments qui ont incité la Commission à aborder le sujet dans une perspective éthique.

Le présent avis de la Commission comprend trois chapitres qui permettent de faire le point sur les aspects scientifiques, juridiques et éthiques des nanotechnologies. Outre la protection de la santé et de l'environnement, le respect de nombreuses valeurs a guidé la Commission dans son évaluation éthique des nanotechnologies; ces valeurs sont, entre autres, la dignité, la liberté, l'intégrité et le respect de la personne, la qualité de vie, le respect de la vie privée, la justice et l'équité, la transparence et la démocratie.

La Commission formule **huit recommandations** à l'intention des décideurs politiques et autres acteurs concernés. À certaines reprises, lorsqu'il lui est apparu impossible de formuler une recommandation spécifique sur un sujet donné qu'elle juge cependant important, la Commission propose un **commentaire** lui permettant de mettre l'accent sur un aspect ou l'autre de la question abordée afin que la société québécoise puisse se donner les moyens d'agir et de prendre des décisions éclairées en matière de nanotechnologies.

Un nouveau monde en émergence : l'univers des nanotechnologies

Le monde de la nanoscience et de la nanotechnologie se situe à l'échelle du **nanomètre**, c'est-à-dire un milliardième de mètre ou 10^{-9} . La **nanoscience** est l'étude scientifique, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures moléculaires dont au moins une de leurs dimensions mesure entre 1 et 100 nanomètres, dans le

but de comprendre leurs propriétés physicochimiques particulières et de définir les moyens à utiliser pour les fabriquer, les manipuler et les contrôler. Découlant de la nanoscience, la **nanotechnologie** est la conception et la fabrication, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures qui comportent au moins une dimension mesurant entre 1 et 100 nanomètres, qui possèdent des propriétés physicochimiques particulières exploitables, et qui peuvent faire l'objet de manipulations et d'opérations de contrôle.

Aspects marquants à considérer. La taille des particules nanométriques, les propriétés nouvelles qu'acquiert la matière à cette échelle, les modes de manipulation de la matière (selon les approches dites descendante et ascendante), la multidisciplinarité et la convergence disciplinaire des nanotechnologies ainsi que l'engouement généralisé qu'elles suscitent font partie des aspects marquants à considérer dans une réflexion sur ces nouvelles technologies; ils servent aussi de fondement au questionnement éthique qui sous-tend l'avis de la Commission.

Secteurs de recherche et applications. Comme l'électricité et l'électronique, les nanosciences et les nanotechnologies toucheront toutes les sphères de la vie courante. Les applications qui en découlent déjà ou qui pourraient en résulter sont aussi diversifiées qu'il est possible de l'imaginer, parfois déroutantes, souvent fascinantes, dans certains cas préoccupantes. Les quatre grands secteurs de recherche et d'innovation qui jouent actuellement un rôle majeur dans le domaine des nanotechnologies sont les nanomatériaux, la nanoélectronique, la nanobiotechnologie et la nanométrie. Si leurs promesses se réalisent, les nanotechnologies pourraient engendrer des bénéfices dans une multitude de secteurs d'activité allant de la médecine à l'environnement, des technologies de l'information à l'agriculture et à l'alimentation. Toutefois, des questions doivent être posées quant aux répercussions possibles ou hypothétiques de certaines innovations issues des nanotechnologies ou de leur convergence avec d'autres disciplines.

Regard sur les modalités d'encadrement du secteur

En matière de risque, deux facteurs sont à considérer : la probabilité qu'un événement se produise et la nature ou l'importance des dommages qui pourraient en résulter. S'agissant des nanotechnologies, ces deux facteurs ne sont pas toujours présents et soulèvent la question des façons de composer avec l'incertitude scientifique liée à l'état des connaissances dans le domaine, mais aussi avec l'ignorance quant à ce qui pourrait se produire dans la foulée de l'implantation d'une nouvelle technologie.

Le risque et les nanotechnologies. Comme toute autre particule naturelle ou industrielle qui présente des risques de toxicité pour les organismes vivants, les nanoparticules de synthèse (qui sont créées volontairement) sont porteuses de risques associés à leur manipulation ou à des rejets (volontaires ou accidentels) dans l'air, le sol et l'eau qui doivent être pris en considération afin de protéger les travailleurs du secteur, la population et la biodiversité dans son ensemble. De tels risques relatifs à des produits qui ne sont pas issus des nanotechnologies sont actuellement couverts par un certain nombre de lois et de règlements en vigueur qui devront, éventuellement, être adaptés pour tenir compte de l'évolution des nanotechnologies.

Ainsi qu'en témoigne la documentation consultée, il peut aussi exister des risques qui concernent plus spécifiquement les produits issus des nanotechnologies du fait de leurs caractéristiques particulières et pour lesquels la recherche n'est pas toujours concluante :

- la tendance à l'agglutination des particules nanométriques de synthèse et ses effets potentiels sur l'environnement et dans les organismes vivants ;
- l'importance de la surface spécifique de la matière nanométrique par rapport à sa masse, qui contribue à modifier ou à amplifier les propriétés de la matière originale ;
- la réactivité que développent certaines particules nanométriques, notamment les nanopoudres métalliques, laquelle peut engendrer des risques d'explosion, d'inflammabilité ou de toxicité ;
- la capacité qu'a la matière nanométrique de traverser les barrières des systèmes de protection de l'organisme humain et animal (barrières cutanée, pulmonaire, intestinale, placentaire, hématoencéphalique).

L'encadrement actuel. Au Canada comme au Québec, il existe un certain nombre de lois et de règlements qui encadrent le cycle de vie d'un produit, de sa fabrication jusqu'à son élimination ; ces textes législatifs s'appliquent aussi aux nanomatériaux, bien que ceux-ci ne soient pas encore expressément mentionnés. Certains instruments internationaux comportent également des exigences relatives au transport d'un pays à un autre de matières jugées dangereuses et pouvant présenter un risque pour la santé ou l'environnement.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Dans un contexte où le développement des nanotechnologies et la mise en marché de produits nanométriques ou à composants nanométriques sont déjà bien amorcés et ne pourront que s'amplifier au cours des années qui viennent, la Commission estime que la vigilance s'impose et qu'il faudra suivre attentivement l'évolution de ces technologies nouvelles afin d'adapter la réglementation actuelle aux réalités du secteur.

Par ailleurs, afin de répondre aux besoins de l'entreprise, l'autorégulation pourrait combler une partie du vide laissé par une réglementation incomplète dans ce secteur d'activité en émergence. À cet égard, il convient de mentionner que l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), en collaboration avec divers partenaires, prépare actuellement un guide des bonnes pratiques pour les besoins de l'industrie québécoise des nanotechnologies (y compris les laboratoires).

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

La Commission encourage l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail à poursuivre, en collaboration avec ses partenaires, la préparation de son guide de bonnes pratiques afin de le publier le plus tôt possible. Elle invite également les divers ministères que concerne le développement des nanotechnologies à inciter la communauté des chercheurs et des industriels de ce secteur d'activité à respecter les pratiques préconisées dans ce guide, mais aussi à contribuer à la promotion et à l'enrichissement de celui-ci. Dans la perspective d'éviter toute répercussion non désirable des nanotechnologies sur la santé des travailleurs et sur l'environnement, la Commission estime qu'un tel guide s'impose dans l'état actuel du développement des nanotechnologies.

Des approches responsables pour composer avec le risque. Dans l'état actuel des connaissances et du développement des nanotechnologies, la Commission s'est interrogée sur deux avenues à considérer au regard de la nécessité ou non de se doter d'une réglementation dans ce secteur d'activité, soit le recours au principe

de précaution et l'adoption de l'approche « cycle de vie ». Depuis la publication de son avis sur les OGM en 2003, dans lequel elle préconisait l'adoption d'une approche de la précaution qu'elle estimait alors plus souple, la Commission a poursuivi sa réflexion sur le principe de précaution. Insistant sur le fait que le **principe de précaution** est un principe d'action et non pas d'abstention, qui peut guider les décideurs dans un contexte d'incertitude, elle lui reconnaît le mérite de susciter de nombreuses questions sur la gestion des risques hypothétiques dans une société pluraliste et démocratique, sur la façon de tenir compte de l'écart qui existe entre l'acceptabilité du risque individuel et celle du risque collectif, entre des exigences de sécurité sanitaire et environnementale et le souci légitime du développement technologique. De l'avis de la Commission, il y a là matière à débat pour et avec la société.

L'**approche du cycle de vie**, notamment dans une perspective de développement durable, cherche à protéger l'environnement à partir d'une prise en compte des impacts d'une innovation technologique, dès l'obtention des ressources nécessaires à sa fabrication et jusqu'à son élimination finale une fois terminée sa vie utile. La notion de *développement durable* est entendue dans le sens qui lui est donné à l'article 2 de la *Loi sur le développement durable* (2006) : « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. [II] s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement. » Bien qu'il en soit question à deux reprises dans la loi, la définition retenue de développement durable ne fait cependant pas référence à la notion de cycle de vie que certains chercheurs estiment « essentielle à l'atteinte d'un développement durable ».

Recommandation n° 1

La Commission recommande :

que le gouvernement du Québec, guidé par le principe de précaution et dans une perspective de développement durable, se préoccupe de toutes les phases du cycle de vie d'un produit issu des nanotechnologies ou comportant des éléments nanométriques et qu'à cet effet il intègre la notion de « cycle de vie » dans toutes ses politiques où une telle approche est appropriée, de façon à éviter toute conséquence dommageable d'une innovation technologique sur la santé et sur l'environnement.

Nanotechnologies : préoccupations d'ordre éthique

Des exigences fondamentales comme prémisses

Le caractère émergent des nanotechnologies et l'apport de nombreuses disciplines à leur avènement font en sorte que des actions s'imposent comme prémisses à leur développement systématique et responsable.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Le constat premier que tout observateur peut faire à l'égard des nanotechnologies, c'est le manque flagrant d'information pour bien connaître ce qu'elles sont. Or, comment prendre des décisions éclairées, en tant que législateur, chercheur, entrepreneur, travailleur ou citoyen, s'il n'existe pas une compréhension commune de ce que sont les nanotechnologies ? Établir une terminologie et une nomenclature scientifiques communes, mettre sur pied des procédures et des standards et poursuivre la recherche et la diffusion des résultats apparaissent à la Commission comme les trois prémisses indispensables à une gestion responsable du développement des nanotechnologies.

Préoccupations éthiques associées aux produits issus des nanotechnologies

En matière de santé humaine

La protection des travailleurs. Deux observations ont attiré l'attention de la Commission. En premier lieu, il faut s'inquiéter du peu de recherches entreprises jusqu'à maintenant en ce qui concerne les conséquences possibles des nanomatériaux sur la santé et la sécurité humaines. Un des obstacles notés par l'IRSST et qui expliquent en partie le manque de connaissances en hygiène industrielle est que « les outils actuels d'évaluation de l'exposition des travailleurs normalement utilisés [...] sont mal adaptés à l'application aux nanoparticules en milieu de travail », alors que « les quelques données disponibles suggèrent que les expositions peuvent être substantielles lors de la manipulation* ».

En second lieu, les spécialistes ne s'entendent pas sur l'à-propos de la réglementation existante. Il sera difficile de trancher sur cette question tant que des données plus précises sur les effets potentiels des nanotechnologies ne seront pas disponibles. **En attendant l'avancement de la recherche et une réglementation plus complète et mieux adaptée aux spécificités des nanotechnologies, la Commission estime que le principe de précaution doit guider les actions à entreprendre afin de protéger la santé et la sécurité des travailleurs.**

La publication de guides de bonnes pratiques ou d'ouvrages comme ceux que produit l'IRSST relativement à l'état des connaissances sur les nanoparticules et aux effets possibles de ces particules sur les travailleurs s'inscrit au nombre des actions qui peuvent être entreprises pour assurer une gestion responsable des nanotechnologies. À cet effet, **la Commission souligne l'importance que les données colligées par l'IRSST demeurent le plus à jour possible et que ces informations soient transmises aux entreprises et aux centres de recherche actifs dans le secteur des nanotechnologies, afin que ces derniers puissent prendre des mesures adéquates de protection des travailleurs.**

* INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les nanoparticules. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité du travail*, Claude OSTIGUY et collaborateurs, Rapport R-455, Études et recherches, Gouvernement du Québec, mars 2006, p. iv [en ligne] http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100189.html.

La protection de la population. L'assurance de l'innocuité des produits issus des nanotechnologies est une préoccupation majeure dans la réflexion de la Commission. Or, il est impossible de savoir à l'heure actuelle si les produits déjà commercialisés peuvent être nocifs à l'usage, parce qu'il existe peu de résultats de recherche concernant leurs effets sur les animaux, l'environnement ou les êtres humains. De plus, des experts s'inquiètent du peu de moyens dont disposent les autorités sanitaires pour contrôler les produits mis en marché. Enfin, même si ces autorités avaient les moyens et le personnel nécessaires, il n'en faudrait pas moins que des normes d'acceptation soient édictées, ce qui n'est pas encore le cas.

Recommandation n° 2

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, en collaboration avec le ministre de la Santé et des Services sociaux, intervienne auprès du gouvernement fédéral afin que ses agences de contrôle en matière de santé et d'environnement mettent en place les mécanismes nécessaires à une évaluation de la toxicité des processus et des produits issus des nanotechnologies avant d'en autoriser la commercialisation.

Le développement technologique comme facteur d'enrichissement collectif et d'amélioration de la qualité de vie des citoyens est certes une valeur importante dans nos sociétés, et le développement des nanotechnologies semble pouvoir y contribuer; mais en aucun cas il ne peut se faire au détriment de la santé et de la sécurité des travailleurs ou des citoyens, qui constituent des valeurs prioritaires. **La Commission est d'avis que des mesures de prévention adéquates et une bonne connaissance du cycle de vie des produits issus des nanotechnologies contribueront à protéger la santé et la sécurité humaines et participeront au développement responsable de ce secteur d'activité.**

Les applications dans le domaine de la santé : l'éthique de la recherche biomédicale. Considérant l'avenir prometteur des nanobiotechnologies, il importe d'appliquer rigoureusement les principes de l'éthique de la recherche afin de protéger les sujets de recherche qui participent volontairement à l'avancement des connaissances. Les comités d'éthique de la recherche étant à l'avant-plan dans la protection des sujets humains,

les membres de ces comités doivent être sensibilisés aux questions qui se poseront dans la poursuite de recherches sur les nanobiotechnologies et outillés pour y réagir adéquatement.

Recommandation n° 3

La Commission recommande :

que le ministre de la Santé et des Services sociaux s'assure que les comités d'éthique de la recherche seront adéquatement outillés et soutenus dans leur évaluation de protocoles de recherche portant sur l'utilisation dans le domaine médical des matériaux et procédés issus des nanotechnologies.

Diagnostics et applications thérapeutiques. La question de l'interférence des nanoparticules avec le fonctionnement du corps humain (ou avec l'environnement) retient particulièrement l'attention de la Commission. Par exemple, en raison de la capacité qu'ont les nanoparticules de traverser la barrière hématoencéphalique, leur utilisation présente un intérêt certain dans le traitement des maladies d'origine neurologique, mais elle constitue également une source de préoccupation. La barrière hématoencéphalique est l'ultime rempart du cerveau contre les agressions extérieures de certains microorganismes. Or, le fait d'avoir trouvé de nouvelles façons de déjouer les défenses naturelles du cerveau, grâce à des technologies qui sont, de surcroît, encore peu maîtrisées et invisibles à l'œil nu, pourrait bien avoir des conséquences déplorables si la R-D nanotechnologique n'est pas suffisamment balisée.

L'état actuel des connaissances ne permet guère à la Commission d'extrapoler sur l'impact économique potentiel de l'introduction de nouvelles méthodes de diagnostic et de traitement faisant appel à des nanotechnologies. Vraisemblablement, certaines de ces nouvelles technologies permettraient des économies pour le système de santé, alors que d'autres représenteront des coûts prohibitifs. La Commission s'interroge également sur une offre de diagnostic qui ne serait pas assortie d'une offre thérapeutique. Cette possibilité existe déjà et n'est pas sans rappeler les réflexions entourant le diagnostic génétique qui ont été menées par la Commission dans son avis sur les banques d'information génétique. L'ensemble de ce questionnement renvoie au problème beaucoup plus large de l'allocation des ressources et de la gouvernance, où des choix de société importants devront être débattus sur la place publique.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

La Commission insiste sur l'importance de se laisser guider par la précaution dans le processus de création et de mise au point de médicaments et de thérapies à composants nanotechnologiques. Une telle approche incite à poursuivre la recherche et à documenter les effets potentiellement positifs et négatifs des applications nanotechnologiques dans le domaine des soins de santé afin de mieux évaluer les retombées pour les malades et pour le fonctionnement du système de santé en général.

En matière d'environnement

Les nanotechnologies pourraient avoir de nombreux impacts positifs sur l'environnement, se présentant ainsi en appui au développement durable. Les bienfaits potentiels des nanotechnologies doivent être encouragés; toutefois, leur innocuité reste à démontrer et leurs effets potentiellement indésirables ne peuvent être balayés du revers de la main.

Selon la documentation consultée, la plus grande source d'exposition environnementale appréhendée concerne, à court terme, l'utilisation de nanoparticules dans l'assainissement des eaux ou des sols contaminés, en raison de l'impact que pourrait avoir la grande réactivité des nanoparticules sur les plantes, les animaux, les microorganismes et les écosystèmes. Les données cumulées jusqu'à maintenant ne permettent pas de tracer un portrait fiable de la situation. Des études préliminaires ont cependant démontré que certains nanomatériaux peuvent endommager les organes et les tissus d'organismes vivants. Dans le cadre du présent avis, **la Commission ne peut qu'insister sur l'importance de multiplier les recherches sur les conséquences potentielles des nanotechnologies afin de déterminer quelles substances pourraient être dommageables. Cette proposition commande un engagement de la part des chercheurs, des industriels et des organismes gouvernementaux.**

Si certaines réponses peuvent être fournies à partir d'études en laboratoire, d'autres devront nécessairement provenir d'analyses *in situ* – ce sera le cas par exemple pour des effets des nanotechnologies qui sont inattendus (non prévus) ou qui ne se produiront qu'à long terme. Par exemple, il est possible que certains produits aient des effets dommageables sur l'environnement par leur accumulation dans divers systèmes régulateurs de l'environnement.

Recommandation n° 4

La Commission recommande :

- que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, en concertation avec le ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et les divers acteurs concernés, mette en place un système de veille relatif aux effets potentiels des nanotechnologies sur l'environnement, lorsque ces effets ne peuvent être calculés et pris en compte avant la commercialisation de produits issus des nanotechnologies;
- qu'une procédure soit élaborée afin d'assurer le retrait rapide des produits mis en cause advenant le constat d'effets délétères sur l'environnement.

En matière de sécurité

Depuis l'attaque terroriste du 11 septembre 2001 aux États-Unis, les questions de sécurité et de défense militaire ont pris une dimension accrue qui se répercute partout dans le monde. Assurer la protection du territoire et des populations devient un enjeu prioritaire des gouvernements, à la fois sur le plan militaire et sur celui de la sécurité publique, et amplifie la vague d'intégration technologique amorcée à la fin des années 1980. Dans un cas comme dans l'autre, les nanotechnologies présentent un potentiel d'applications d'une grande diversité en matière de sécurité.

Dans le domaine militaire. Les applications dans ce domaine soulèvent deux préoccupations majeures sur le plan de l'éthique : celle des finalités et celle du secret quant à ce qui se fait dans les laboratoires et aux résultats obtenus. Apparaît donc au premier plan toute la question de la transparence, qui pose un problème d'ordre éthique et qui suscite des interrogations sur le degré de confiance que la population peut ou doit accorder aux responsables décisionnels dans le domaine militaire. Un constat fondamental est aussi à faire : dans tout l'arsenal de recherches et de projets en développement, la mise au point de moyens d'attaque ou de défense contre l'ennemi constitue la raison d'être des diverses agences mises en place et des sommes phénoménales y sont consacrées ; à première vue, toutefois, très peu d'efforts semblent porter sur les moyens d'éviter les conflits. **Un questionnaire doit se faire sur l'encadrement éthique de la recherche militaire et sur les enjeux éthiques qui sont associés au développement de nouvelles applications militaires issues des nanotechnologies.**

Dans la société civile. Dans le cadre d'un document de réflexion sur l'utilisation des données biométriques à des fins de sécurité, la Commission aborde la problématique de la surveillance et s'interroge sur une intrusion possible de l'État et des organisations dans la vie privée des citoyens et des travailleurs. Différentes technologies sont certes mises à contribution à cet effet, mais les nanotechnologies augmentent et facilitent les possibilités actuelles et ouvrent la porte à la collecte et à l'utilisation d'informations sur les citoyens et les travailleurs sans aucune mesure avec les possibilités qui existaient jusqu'à présent. **La Commission est inquiète de constater que, au nom de la sécurité, il apparaît aujourd'hui possible d'avoir des exigences moindres à l'égard de la protection des renseignements personnels et de leur confidentialité, du droit à la vie privée et des libertés civiles.**

La convergence des connaissances et des disciplines

La convergence des nanotechnologies avec d'autres disciplines comme la biologie, les technologies de l'information et de la communication et les sciences cognitives s'accompagne de nombreux défis éthiques et sociaux, notamment en ce qui concerne l'identité humaine et le rapport de l'être humain avec la nature.

L'identité humaine dans un contexte d'optimisation des performances. Les nanotechnologies pourraient contribuer à optimiser certaines caractéristiques physiologiques de l'être humain ; les développements pressentis grâce à la convergence des connaissances et des technologies n'ont pratiquement aucune limite et peuvent inclure les capacités cognitives. Certains développements soulèveront bon nombre d'interrogations fondamentales en ce qui concerne les représentations personnelles et sociales de l'identité humaine : ce que nous comprenons et considérons comme être *humain*, ce qui est jugé normal (ou *acceptable*) et ce qui ne l'est pas. Frontière subjective entre thérapie et optimisation des capacités humaines, double discours en ce qui concerne l'insertion de la population handicapée dans la vie « active », culte voué à la performance, équité dans les choix de services offerts par le système de santé public, vision de l'autonomie et de la responsabilité individuelle face à la collectivité, voilà où réside notamment, selon la Commission, le questionnaire éthique posé par l'utilisation des nanotechnologies à des fins d'optimisation des performances humaines. C'est

une réflexion que la Commission poursuivra dans un prochain avis sur les neurosciences.

Le rapport de l'être humain avec la nature. C'est en accord avec l'esprit de la *Loi sur le développement durable* que la Commission considère que l'être humain vit en interdépendance avec l'environnement. La société et ses décideurs doivent tenir compte de cette interdépendance au moment de prendre des décisions qui pourraient avoir un impact sur la qualité de l'environnement, que ce soit dans l'immédiat ou pour les générations futures. Les nanotechnologies pourraient s'avérer un atout non négligeable à cet effet; en contrepartie, il faut reconnaître que certaines applications pourraient également constituer une source de détérioration. **Il y aura donc un équilibre à rechercher dans l'utilisation des nanotechnologies afin d'en tirer le meilleur parti possible au bénéfice du plus grand nombre et dans le respect de l'environnement. Ce sont là des décisions qui concernent l'ensemble de la société et qui doivent être soumises au débat public.**

Préoccupations éthiques non exclusives aux nanotechnologies

Le développement des nanotechnologies suscite certes un questionnement éthique quant aux effets qu'elles pourraient avoir sur la santé et sur l'environnement et par l'utilisation qui pourrait en être faite dans d'autres domaines. Toutefois, comme a pu le constater la Commission, ces technologies, à l'instar d'autres technologies émergentes, soulèvent aussi des préoccupations d'ordre éthique qui ne leur sont pas spécifiques, et qui ne sont pas entièrement nouvelles, mais qui ne peuvent être occultées, car elles risquent d'être amplifiées par l'avènement des nanotechnologies.

En lien avec la gouvernance

La légitimité et la transparence du processus décisionnel. Dans un cadre démocratique, la légitimité passe invariablement par la transparence du processus décisionnel. C'est un sujet sur lequel la Commission a beaucoup insisté dans son avis sur les organismes génétiquement modifiés. La transparence se manifeste également dans les façons d'informer la population; c'est même une condition d'exercice du libre choix accordé à chaque citoyen dans une société démocratique et pluraliste.

Recommandation n° 5

La Commission recommande:

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, avec ses collègues des ministères et des organismes concernés, amorce un processus d'information et d'échanges auprès de la population afin de bien circonscrire, et en toute transparence, les enjeux scientifiques, économiques, sociaux et éthiques qui sont associés au développement des nanotechnologies.

Les mesures d'encadrement et de reddition de comptes. La Commission reconnaît que l'encadrement normatif des nanotechnologies nécessite une meilleure connaissance des conséquences potentiellement néfastes que pourraient entraîner l'introduction et la dissémination de nanoparticules dans l'environnement ou leur pénétration dans les organismes vivants. Cependant, une telle contrainte ne doit en rien limiter les actions de gouvernance relatives aux activités de veille et de réflexion qui doivent accompagner l'émergence d'une nouvelle technologie et celles qui assurent l'adaptation des encadrements existants lorsque les circonstances le dictent. **Il importe aussi que le réseau des divers acteurs du domaine des nanotechnologies se concertent pour adopter des comportements qui s'inscrivent dans une perspective de développement durable. Pour la Commission, la concertation des parties prenantes constitue une prémisse à l'élaboration d'un modèle de gouvernance flexible, adapté à la réalité des nanotechnologies et apte à tenir compte des préoccupations éthiques que ces technologies soulèvent.**

Recommandation n° 6

La Commission recommande:

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation demande aux organismes subventionnaires, en collaboration avec les divers acteurs concernés, de créer un programme de recherche multidisciplinaire sur les impacts des nouvelles technologies et sur la gestion du risque associé aux nanotechnologies, qui tienne compte de leurs dimensions éthique et sociale.

En lien avec l'activité économique

Les choix éthiques dans le développement de l'activité économique québécoise liée aux nanotechnologies. Depuis 2004, le Conseil de la science et de la technologie du Québec coordonne le projet Perspective Science-Technologie-Société (STS) dont le premier objectif est de sensibiliser tous les secteurs de la société québécoise à l'importance et à l'utilité de la science et de la technologie pour comprendre et résoudre les problèmes socioéconomiques. Le deuxième objectif de ce projet consiste à convier la communauté scientifique québécoise à participer aux finalités sociales et économiques de la science et de la technologie. **La Commission est d'avis que ce type d'initiative devrait être appliqué au moment où sera élaborée une stratégie québécoise de développement des nanotechnologies, de façon qu'il soit possible de répondre aux besoins tant économiques que sociaux propres au Québec et de considérer, de manière spécifique, les enjeux éthiques liés à ces technologies.**

Dans son bilan de 2005 sur les nanotechnologies, le President's Council of Advisors on Science and Technology du gouvernement américain rappelle que les nouvelles technologies peuvent en déplacer d'autres qui sont obsolètes et susciter un mouvement parallèle dans les possibilités d'emploi. **Comme ces nouveaux emplois demandent parfois des habiletés différentes, l'organisme souligne que de tels changements peuvent poser des défis majeurs en ce qui concerne la formation de la main-d'œuvre et le système d'éducation. Pour la Commission, il s'agit là d'un enjeu éthique important puisque, souvent, les travailleurs les plus vulnérables de la société sont les victimes des transformations du marché du travail qu'entraîne l'émergence de nouvelles technologies.**

Recommandation n° 7

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, advenant l'élaboration d'une stratégie québécoise de développement des nanotechnologies, prenne en compte les questions éthiques et sociales que ces technologies soulèvent, particulièrement en matière d'emploi et de formation de la main-d'œuvre.

Le fossé nanotechnologique dans le contexte de la mondialisation des marchés. La possibilité de concevoir et de développer l'innovation nanotechnologique de façon à en faire bénéficier les pays en voie de développement ne devrait pas d'emblée être mise à l'écart. Les gouvernements, les entreprises, les fondations et les organisations non gouvernementales sont ou peuvent être sollicités à divers degrés dans la gestion du développement nanotechnologique. Pour ces divers acteurs, l'occasion se présente aujourd'hui de concerter leurs efforts afin de maximiser la réflexion et d'agir de façon solidaire envers les plus démunis.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Dans la même veine, la Commission suggère que s'amplifient ou se tissent des liens de collaboration entre les universités, les fonds subventionnaires et les pays en développement. Des partenariats de recherche en nanotechnologies, des échanges d'étudiants et de professeurs entre universités, ainsi que la mise en place de programmes de subventions dont l'objectif spécifique est de répondre aux besoins signalés par les pays en développement à l'égard des nanotechnologies devraient être considérés par les organismes concernés.

En général, qui contrôle la R-D contrôle également les moyens de production et l'offre de produits et services. Si les besoins des pays en développement sont pris en considération dans les orientations de la recherche, il faut également miser sur la croissance d'industries locales qui créeront une richesse durable. Les partenariats entre ceux qui possèdent le savoir et les capitaux et ceux qui possèdent un marché à exploiter doivent être encouragés, à la condition qu'ils soient conçus au bénéfice de chacun et que le partage des responsabilités soit équitable; il s'agit là d'une question de respect et de solidarité.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Considérant que la solidarité humaine se traduit notamment par des gestes de collaboration et de partage de la richesse, la Commission encourage le soutien de la formation de chercheurs et la mise en place d'infrastructures de R-D dans les pays en émergence et dans ceux en développement, en vue de favoriser l'acquisition d'une expertise industrielle dans ces pays et d'éviter que se creuse davantage le fossé technologique.

La propriété intellectuelle et la gestion des brevets. La gestion des brevets et de la propriété intellectuelle peut être vue comme une source dynamique d'innovation, mais également comme un frein à l'accès aux connaissances et aux outils nécessaires à la R-D. Ainsi que le suggèrent certains auteurs, une façon de s'attaquer au problème serait de s'inspirer de la protection de la propriété intellectuelle utilisée en informatique pour les logiciels libres (*open source*) en ce qui a trait aux recherches financées par le public. Une autre possibilité serait l'établissement de communautés de brevets (*patent pools*).

La Commission souligne également l'initiative des National Institutes of Health américains (NIH) dans le domaine des biotechnologies, notamment en ce qui a trait à l'annonce d'un partenariat public-privé avec diverses entreprises pharmaceutiques afin d'accélérer la recherche en génétique sur des maladies multifactorielles. L'intérêt réside dans l'assurance donnée par les NIH que les résultats des recherches seront accessibles à tous.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

L'initiative des NIH soulève cependant un certain nombre de questions plus larges. Les initiatives fondées sur des partenariats publics-privés en matière de recherche et de mise en marché sont-elles équitables pour le Québec? Quels sont les effets positifs et négatifs de ces partenariats? Les bienfaits potentiels contrebalancent-ils les effets négatifs? Ces derniers peuvent-ils être amoindris ou éliminés? Serait-il possible de mettre en place des mesures incitatives en vue de favoriser l'activité philanthropique? Devant toutes ces questions, la Commission estime impératif qu'une réflexion poussée sur le rôle de la protection de la propriété intellectuelle dans un contexte d'innovation soit entreprise et que soient mises en évidence les questions d'éthique qui pourraient y être associées.

La collecte de renseignements personnels. La convergence des nanotechnologies et des technologies de l'information pourrait permettre de tracer des profils types très spécialisés à des fins de marketing, mais également en vue d'exercer un contrôle policier, social ou politique sur la population ou certaines communautés. **La Commission rappelle avec insistance que les collectes de renseignements ne peuvent être faites à l'insu des consommateurs et que des lois existent déjà en matière de protection des renseignements personnels obligeant les organismes publics et privés à donner accès à son dossier d'information à toute personne qui en fait la**

demande. Le problème réside dans le fait que peu de personnes sont au courant de ces obligations et que, de surcroît, les sanctions sont rarement appliquées pour les entreprises et les organismes, publics ou privés, qui ne respectent pas les règles établies.

Enfin, l'accès à l'information génétique constitue une autre facette de la protection des renseignements personnels à ne pas négliger. Avec les nanotechnologies, les biopuces à ADN sur silicium ouvrent la voie à l'analyse du contenu génétique des cellules *in situ* – bientôt il sera possible pour un médecin de « lire » le code génétique d'un patient directement dans son bureau de consultation et d'obtenir ainsi quantité de renseignements sur l'état de santé de cette personne et sur sa prédisposition génétique à développer certaines maladies. Comme elle le soulignait dans son avis sur les banques d'information génétique, la Commission rappelle que l'utilisation de l'information génétique à d'autres fins que médicales, notamment par les assureurs, les employeurs et les institutions financières, est une pratique susceptible de favoriser la discrimination dans la prise de décision concernant les personnes visées (clients, employés et emprunteurs, par exemple). **La Commission estime toujours que toute forme d'utilisation de l'information génétique par des tiers autres que les professionnels de la santé et autrement qu'à des fins de traitement devrait être soumise à un débat de société sur ces pratiques et leurs finalités.**

En lien avec la citoyenneté et l'innovation technologique

La consommation est de plus en plus perçue comme un enjeu de pouvoir où les citoyens revendiquent le droit de faire des choix qui reflètent leurs valeurs. Il faut voir dans cet exercice de la citoyenneté un signe de santé de la démocratie, à la condition, cependant, que les citoyens soient conscients de leur potentiel d'influence, qu'ils reconnaissent la responsabilité qui accompagne tout acte décisionnel et, enfin, qu'ils aient accès à une information claire et objective.

L'autonomisation des citoyens (ou *empowerment* en anglais) se traduit notamment par la volonté de faire des choix qui respectent les valeurs individuelles et sociales de chacun. Si l'information claire et accessible est un préalable, elle représente un défi de taille, notamment dans le cas des nanotechnologies, en raison de

la complexité de ces technologies et de la diversité des possibilités d'application. **La Commission rappelle l'importance de transmettre une information juste à la population et de favoriser sa participation dans la prise de décisions au sujet des nanotechnologies.**

Recommandation n° 8

La Commission recommande :

que le gouvernement du Québec s'inspire des travaux réalisés pour la mise en place d'un portail Internet sur les organismes génétiquement modifiés afin de créer un portail d'information sur les nanotechnologies à l'intention de la population.

Même si l'information est disponible et facilement accessible, il faut s'assurer que les citoyens sont sensibilisés à la question des nouvelles technologies et qu'ils en comprennent les tenants et aboutissants; c'est une responsabilité qui leur incombe mais dont ils ne mesurent pas toujours l'importance. Il faut de plus constater qu'il existe actuellement une diminution de l'intérêt des jeunes pour une formation en science et technologie, alors que la consommation de produits technologiques ne cesse d'augmenter. Dans un tel contexte, **la Commission estime qu'il devient urgent de se pencher sur des mécanismes de rapprochement avec la population qui aideraient à pallier un manque d'information relativement neutre et objective sur l'innovation technologique.**

C'est avec beaucoup de curiosité et d'intérêt que la Commission a amorcé sa réflexion sur les enjeux éthiques soulevés par le développement des nanotechnologies. D'une part, parce que le sujet est encore peu connu; d'autre part, parce que le potentiel de développement et d'utilisation de la matière à l'échelle nanométrique semble à l'heure actuelle sans limite. Il est d'ailleurs facile de s'émerveiller, voire de se laisser emporter par l'euphorie et l'enthousiasme qui animent une bonne partie des acteurs concernés.

Au fil de sa réflexion, la Commission a constaté l'ampleur et la complexité de la tâche qu'elle s'était elle-même assignée, c'est-à-dire de documenter le développement de la nanoscience et des nanotechnologies afin de cerner les enjeux éthiques qui accompagnent leur émergence. En effet, les nanotechnologies touchent tous les domaines, avec une diversité d'applications et des potentiels d'utilisation très différents. De plus, la réflexion entourant les nanotechnologies est complexifiée du fait que la matière nanométrique est invisible à l'œil nu; leurs effets, positifs ou négatifs, seront cependant bien tangibles. Enfin, le fait qu'il s'agisse de technologies en émergence signifie également qu'il est aujourd'hui impossible de prévoir toutes les applications qui verront le jour et quelles pourraient être leurs répercussions sur le Québec et sur le reste du monde.

La réflexion sur les enjeux éthiques et sociaux des technologies s'amorce à peine et il faudra continuer à réfléchir, discuter, émettre des opinions sur les nanotechnologies et sur la manière d'assurer leur développement harmonieux. Aussi, la Commission estime-t-elle nécessaire que se poursuive sa réflexion sur des questions plus précises que l'État pourrait se poser en ce qui concerne la gestion responsable des nanotechnologies, au fur et à mesure des orientations ou des décisions qu'il aura à prendre en la matière dans l'avenir.

Introduction

Au Québec, c'est en 2001 que les nanotechnologies*¹ ont fait une première percée sur la scène publique avec la création de NanoQuébec, qui s'inscrivait dans la foulée des recommandations d'un avis du Conseil de la science et de la technologie, *Les nanotechnologies: la maîtrise de l'infiniment petit*², publié la même année. Le Québec se dotait ainsi d'une infrastructure qui lui permettait de se joindre au mouvement international déjà amorcé pour assurer le développement et la promotion des nanotechnologies; il est aujourd'hui considéré comme un chef de file à l'échelle canadienne³. Constatant que plus de 175 chercheurs universitaires et une quarantaine de PME sont actifs en nanotechnologies sur le territoire québécois⁴, et dans un contexte où de plus en plus de produits issus des nanotechnologies sont offerts sur le marché, la Commission de l'éthique de la science et de la technologie a jugé bon d'amorcer une réflexion sur les enjeux éthiques que posent le développement et l'innovation technologiques dans ce domaine.

Avec la nanotechnologie, la Commission découvre un univers scientifique captivant, mais aussi fort complexe et très éclaté en raison, notamment, de la grande multidisciplinarité du domaine. C'est aussi un domaine en émergence, et donc qui offre la possibilité de travailler

en amont des problèmes que pourrait éventuellement poser l'innovation technologique, de façon à contrer ou à réduire au minimum certains effets indésirables. En même temps, cette émergence soulève aussi toute la question de l'incertitude et de l'ignorance en matière de risques, les efforts de recherche en la matière étant encore limités. Dans ce contexte, et très tôt dans son exploration documentaire du sujet et la consultation d'experts, la Commission a compris qu'il lui serait impossible d'aller aussi loin qu'elle l'aurait souhaité dans son évaluation des enjeux éthiques de la nanotechnologie. Néanmoins, et dans l'état actuel des choses, elle estime que le présent avis constitue une prise de conscience essentielle à un développement éclairé et responsable du domaine; il serait cependant souhaitable que ses travaux puissent se poursuivre pour en accompagner l'évolution.

Si le préfixe « nano » tend à pénétrer la langue populaire, principalement par la publicité qui l'utilise pour caractériser des objets de très petites dimensions (comme certains baladeurs numériques ou des blocs de construction pour enfants) mais sans véritable apport de la nanotechnologie, le concept même de nanotechnologie demeure encore obscur pour la plupart des gens⁵. Succinctement, la nanoscience* et la nanotechnologie

1. Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire présenté à la fin du présent avis.

2. CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les nanotechnologies: la maîtrise de l'infiniment petit*, Gouvernement du Québec, juin 2001 [en ligne] <http://www.cst.gouv.qc.ca>.

3. MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE, DE L'INNOVATION ET DE L'EXPORTATION (Québec), « Nanotechnologies au Québec » [en ligne] http://www.mdeie.gouv.qc.ca/page/web/portail/fr/scienceTechnologie/service.prt?svcid=PAGE_GENERIQUE_CATEGORIES40&iddoc=65662.

4. *Ibid.*

5. Ainsi que le montrent les sondages réalisés sur le sujet. Voir, entre autres, Edna F. EINSIEDEL, *In the Public Eye: The Early Landscape of Nanotechnology among Canadian and U.S. Publics*, Report to the Canadian Biotechnology Secretariat and the NSERC Nanotechnology Innovation Platform, University of Calgary, non daté [en ligne] <http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=1468>; GÉNOME PRAIRIE (Canada), *Premières impressions: comprendre les opinions du public sur les technologies émergentes*, Document établi par l'équipe GE3LS de Génome Prairie à l'Université de Calgary, non daté [en ligne] https://bioportal.gc.ca/CMFiles/CBS_Report_FINAL_FRENCH249SFP-9222005-5789.pdf; Michael COBB et Jane MACOUBRIE, « Public Perceptions about Nanotechnology: Risks, Benefits and Trust », *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 6, n° 4, août 2004 [en ligne] <http://www.wilsoncenter.org/events/docs/macoubriereport.pdf>. Voir aussi un résumé des plus récents sondages, présenté dans le chapitre 4 (p. 41-56) de Matthew KEARNES, Phil MACNAGHTEN et James WILSDON, *Governing at the Nanoscale. People, Policies and Emerging Technologies*, Londres, DEMOS, 2006 [en ligne] <http://www.demos.co.uk/catalogue/governingatthenanoscale/>.

concernent la matière et ses structures à l'échelle du nanomètre* (à des fins d'illustration, précisons que le diamètre d'un seul cheveu varie entre 50 000 et 100 000 nanomètres) afin d'exploiter les propriétés particulières qui peuvent s'y développer dans une dimension inférieure à 100 nanomètres et qui sont dues aux effets quantiques* se produisant à cette échelle. Au nombre des propriétés les plus courantes qui sont recherchées, mentionnons la résistance, la légèreté, la malléabilité, l'ininflammabilité et la conductivité. Ces propriétés sont obtenues dans la fabrication de nanomatériaux*, comme les nanotubes*, les fullerènes*, les points quantiques*, les nanoparticules*, les nanopoudres*, les nanocouches* et sous bien d'autres formes que peut prendre la matière à l'échelle nanométrique*.

Succès phénoménal de la science, enthousiasme débordant des chercheurs, imaginaire débridé des auteurs de science-fiction, il semble y avoir un peu de tous ces éléments dans les possibilités que laisse entrevoir le développement des technologies de l'infiniment petit. Née de la convergence* des recherches fondamentales en physique, en chimie et en biologie, la nanotechnologie est souvent présentée comme l'une des technologies les plus prometteuses pour l'avenir de l'humanité. Avec l'évolution et les succès de la recherche, la nanotechnologie est de moins en moins confinée dans les laboratoires universitaires, et ses applications apparaissent peu à peu dans une multitude de secteurs d'activité, que ce soit en optique ou en électronique, dans les technologies de l'information, dans le génie des matériaux comme dans le textile, en environnement, mais aussi dans les domaines de la médecine, de la pharmacutique et même de la sécurité nationale. Des crèmes solaires et divers produits cosmétiques, des pellicules photographiques, de la peinture, des électroménagers, des disques durs, certains textiles et bon nombre d'articles de sport font aujourd'hui partie des produits comportant un apport nanotechnologique parmi les plus courants qui sont offerts sur le marché⁶.

Ce passage du laboratoire à la fabrication industrielle et à la commercialisation de produits ayant des composants nanométriques, tout comme les investissements des gouvernements dans le développement et la promotion d'une technologie dont les retombées pourraient être

sans précédent, sont des éléments qui ont incité la Commission à aborder le sujet dans une perspective éthique. À n'en pas douter, les bénéfices attendus sont énormes et pourraient éventuellement contribuer à résoudre bien des problèmes que vivent les sociétés contemporaines (développées ou non). De quelle nature seront les changements attendus ou escomptés? Quelles seront les incidences de l'innovation nanotechnologique sur les personnes – citoyens, consommateurs et travailleurs – et sur la société dans son ensemble, sans oublier les générations futures? Pourrait-il y avoir des conséquences indésirables en matière de santé ou d'environnement, ou dans d'autres domaines, qu'il faudrait prévoir, afin de les éviter ou de les réduire au minimum? Des problèmes mis en évidence au cours des dernières années pour l'amiante, le mercure, le plomb, le DDT, le fréon, et tout récemment le téflon, obligent à s'interroger sur les effets à long terme de substances nouvelles – comme les nanomatériaux. Des questions se posent aussi sur certaines finalités auxquelles peut conduire la nanotechnologie, particulièrement en matière d'optimisation des performances humaines (physiques ou intellectuelles). Enfin, s'ajoutant à d'autres technologies qui ont émergé dans la deuxième partie du 20^e siècle – les biotechnologies, la génomique, la protéomique, la génétique, notamment –, la nanotechnologie met en évidence la nécessité de régler un certain nombre de problèmes inhérents aux progrès de la science et de la technologie dans les sociétés démocratiques et pluralistes, dont la propriété intellectuelle et la gestion des brevets, par exemple, ou le rôle des citoyens dans la prise de décision en matière scientifique.

L'avis de la Commission comprend trois chapitres qui permettent de faire le point sur les aspects scientifiques, juridiques et éthiques des nanotechnologies. Outre la protection de la santé et de l'environnement, et l'importance du développement de l'économie dans les sociétés contemporaines, le respect de nombreuses valeurs qui doivent constituer les fondements d'un comportement responsable au regard des nanotechnologies a guidé la Commission dans son évaluation éthique des nanotechnologies; ce sont, entre autres, la dignité, la liberté, l'intégrité et le respect de la personne, la qualité de vie, le respect de la vie privée, la justice et l'équité, la transparence, de même que la démocratie.

6. Consulter le site de NanoQuébec pour une information à jour sur les nouveaux produits mis en marché ou en développement : <http://www.nanoquebec.ca>. Voir aussi l'inventaire des produits de consommation issus des nanotechnologies présenté par le Woodrow Wilson International Center for Scholars à l'adresse suivante : <http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>.

Le premier chapitre définit les termes fondamentaux du sujet à l'étude – nanomètre, nanoscience et nanotechnologie – et présente brièvement quelques jalons importants de la courte histoire de la nanotechnologie. Sont ensuite décrits les aspects marquants de cette technologie qui constituent en quelque sorte les prémisses au questionnement éthique de la Commission sur le sujet : le caractère invisible de la matière nanométrique, les propriétés spécifiques qu'elle développe, les modes de manipulation auxquels elle se prête (selon des approches dites descendante ou ascendante), la multidisciplinarité et la convergence disciplinaire, l'engouement généralisé pour le développement des nanotechnologies. Dans une deuxième partie du chapitre, la Commission propose un bref survol du domaine dans quatre secteurs de recherche et d'innovation – les nanomatériaux, la nanoélectronique*, la nanobiotechnologie* et la nanométrie* – afin d'illustrer certains bénéfices que peuvent apporter les nanotechnologies et de signaler la nature des préoccupations qu'elles soulèvent.

Dans le deuxième chapitre, la Commission considère les mécanismes qui peuvent encadrer le développement des nanotechnologies et l'innovation technologique qui en découle. À cette fin, elle indique d'abord quels sont les risques qui sont perçus dans l'état actuel du développement des nanotechnologies et quelles sont les particularités des produits nanométriques susceptibles de poser des risques en matière de santé et d'environnement. À ce titre, elle s'interroge sur le bien-fondé des modalités d'évaluation en vigueur quand il s'agit des produits issus des nanotechnologies. Après avoir constaté qu'il n'existe pas de lois ou de règlements au Québec et au Canada – pas plus qu'ailleurs dans le monde, faut-il préciser – qui concernent expressément le secteur des nanotechnologies (de la manipulation de la matière nanométrique jusqu'à son élimination), la Commission mentionne les lois et règlements québécois et canadiens qui pourraient intégrer ces nouvelles technologies et pour lesquels une mise à jour à cet égard serait souhaitable. Elle rappelle brièvement quels sont les instruments internationaux qui peuvent concerner les nanotechnologies, à un titre ou à un autre, et souligne l'importance pour l'industrie de pouvoir disposer d'un guide des bonnes pratiques qui puisse contribuer à la mise en place de comportements responsables en matière de gestion des risques d'une technologie nouvelle. Enfin, la Commission fait le point sur deux approches à considérer dans l'encadrement des nanotechnologies :

le recours au principe de précaution qui, dans le processus de gestion du risque, permet de considérer l'ignorance quant aux effets dommageables que peut entraîner une innovation technologique et *l'approche « cycle de vie* »*, qui encourage la prise en compte des incidences que peut avoir un produit sur l'environnement, mais aussi sur la société et sur l'économie, tout au long de la durée de vie de ce produit.

Le troisième chapitre témoigne du questionnement éthique auquel s'est livrée la Commission au regard des nanotechnologies, dans l'état actuel de leur développement et des connaissances scientifiques. Dans une première partie, la Commission s'intéresse plus spécifiquement au produit nanotechnologique. En guise de prémisses, elle soulève la nécessité de bien établir les bases sur lesquelles pourra s'établir une gestion responsable des nanotechnologies : une nomenclature commune, l'accès à des procédures et à des échantillons standards pour caractériser la matière nanométrique ainsi que des recherches sur l'innocuité des nanotechnologies et la diffusion des résultats obtenus.

En deuxième partie, sont abordées les préoccupations éthiques liées à la santé, à l'environnement et à la sécurité. En matière de santé, la Commission s'intéresse plus particulièrement à la protection des travailleurs, notamment dans le cadre de la production et de la manipulation de nanomatériaux qui peuvent franchir les barrières naturelles de l'organisme en raison de leur taille, mais aussi à la protection des consommateurs, considérant qu'il existe des produits de consommation à leur intention sur le marché, qui sont appliqués sur la peau, inhalés ou ingérés. Elle fait ensuite le point sur l'apport des nanotechnologies dans le domaine de la médecine, un sujet qui l'amène à soulever la question de l'éthique de la recherche biomédicale en la matière, avant d'aborder l'apport des nanotechnologies dans le diagnostic et le traitement des maladies. Sur le plan de l'environnement, le questionnement éthique est présenté en lien avec la nécessité d'adopter des comportements responsables. La Commission aborde également quelques questions éthiques relatives à l'utilisation des nanotechnologies à des fins militaires et de sécurité publique. Pour conclure cette partie du chapitre, la Commission s'interroge sur l'impact que pourraient avoir les nanotechnologies sur le devenir de l'être humain et sur son rapport à la nature dans une perspective de convergence des connaissances et des technologies.

En troisième partie, la Commission traite succinctement de préoccupations qui relèvent d'une gestion responsable des nanotechnologies et *autres technologies émergentes*. Il est en effet apparu impossible à la Commission d'occulter un certain nombre de préoccupations de nature éthique qui ne relèvent pas exclusivement des nanotechnologies, mais qui touchent également d'autres technologies émergentes comme les biotechnologies, la génomique ou les technologies de l'information et de la communication. Le développement des nanotechnologies risque de donner aux questions soulevées une importance accrue ou une nouvelle dimension qui justifient une réflexion sur le sujet. Le questionnaire proposé porte sur la gouvernance, l'activité économique et l'exercice de la citoyenneté et met notamment l'accent sur la légitimité et la transparence du processus décisionnel, sur l'éventualité que se crée un fossé nanotechnologique* entre pays riches et pays moins nantis, sur la propriété intellectuelle et sur l'autonomisation* (ou l'*empowerment*) des citoyens dans les choix qu'ils ont à faire au regard des nouvelles technologies.

Dans le cadre de son avis, la Commission formule huit recommandations à l'intention des décideurs politiques et autres acteurs concernés. Ces recommandations visent à mettre en place des mesures qui permettront d'agir de façon responsable en ce qui a trait au développement des nanotechnologies et à l'innovation technologique qui l'accompagne afin d'en tirer tous les bénéfices possibles pour la population et les générations futures. À certaines reprises, lorsqu'il lui est apparu impossible de formuler une recommandation spécifique sur un sujet donné qu'elle juge cependant important, la Commission propose un commentaire lui permettant de mettre l'accent sur un aspect ou l'autre de la question abordée dans la perspective que la société québécoise se donne les moyens d'agir et de prendre des décisions éclairées en matière de nanotechnologies.

Pour réaliser le présent avis, la Commission a mis sur pied un comité de travail⁷ composé de membres de la Commission, de divers acteurs issus des milieux universitaire et gouvernemental et d'un représentant citoyen qui s'intéressent, à un titre ou à un autre, au développement des nanotechnologies et aux enjeux éthiques qui en découlent. Les travaux du comité se sont inspirés des réflexions plus larges menées sur la scène internationale relativement aux enjeux économiques, environnementaux, éthiques, juridiques et sociaux des nanotechnologies (les *NE³LS* en anglais⁸). Exceptionnellement, la Commission s'est assuré la collaboration de l'Office québécois de la langue française (OQLF) pour garantir la qualité de la terminologie française utilisée dans son avis⁹. Les travaux du comité se sont échelonnés de décembre 2004 à avril 2006. La Commission souhaite manifester sa reconnaissance au président et aux membres du comité pour l'excellence de leur contribution tout au long de la préparation du projet d'avis, aux experts qui ont gracieusement accepté d'apporter leur éclairage aux réflexions du comité¹⁰ et aux professionnels du secrétariat qui ont permis de mener à terme la réalisation de l'avis.

7. La liste des membres du comité apparaît au début du présent avis.

8. C'est-à-dire « *the economic, environmental, ethical, legal and social issues of nanotechnology* ».

9. Les résultats de cette collaboration se traduisent par un glossaire présenté à la fin du texte, un contenu du domaine des nanotechnologies enrichi et mis à jour dans *Le grand dictionnaire terminologique* sur le site de l'OQLF (<http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>), ainsi que la présence d'un glossaire terminologique de l'OQLF sur le site de NanoQuébec [en ligne] http://nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/explorateur.jsp?currentlySelectedSection=259.

10. Une liste des personnes consultées est présentée à la fin de l'avis.

Chapitre 1

Un nouveau monde en émergence : l'univers des nanotechnologies

Invisible et mystérieux, l'univers de l'infiniment petit se situe à l'échelle de l'atome et s'exprime en nanomètres. C'est une dimension qui échappe à l'œil nu et aux microscopes les plus puissants. Pour y accéder, il a fallu l'invention du microscope à effet tunnel. Depuis, la nanoscience et les nanotechnologies ont pris leur envol et se développent de façon exponentielle au carrefour de plusieurs disciplines, dont la biologie, la physique, la chimie et l'informatique. Les nanomatériaux, la nanoélectronique et la nanobiotechnologie permettent d'exploiter les propriétés spéciales de la matière pour créer de nouveaux produits ou transformer des produits existants, exploiter de nouvelles façons de faire. Si les nanotechnologies ont déjà ou laissent présager des applications utiles ou bénéfiques dans de nombreux secteurs d'activité, il importe toutefois de déterminer si des questions d'ordre éthique doivent être soulevées relativement à l'émergence de ces nouvelles technologies et aux conséquences indésirables qu'elles pourraient avoir sur le genre humain et sur la collectivité, de façon à intervenir adéquatement le plus tôt possible.*

Un monde à découvrir¹¹

En 2001, dans son avis sur les nanotechnologies, le Conseil de la science et de la technologie soulignait en ces termes l'intérêt que présentent les nanotechnologies : « Les nanotechnologies sont à proprement parler révolutionnaires. En effet, à l'échelle nanométrique les matériaux et les systèmes peuvent révéler des caractéristiques complètement nouvelles qui en modifient sensiblement les propriétés, de même que les phénomènes et les processus physiques, chimiques et biologiques en cause. Les modifications sont si fondamentales que les propriétés de la matière au niveau nanométrique ne peuvent être déduites de celles de la matière solide à plus grande échelle. [...] Il y a donc lieu de prévoir que les nanotechnologies constitueront une véritable révolution technologique puisqu'elles permettront à l'homme de contrôler la matière au niveau de l'atome¹². »

Dans cet ordre d'idées, une étude préalable à l'avis situait dans le temps la révolution technologique qui s'amorce : « on s'entend pour dire que les nanotechnologies

constitueront la troisième révolution technologique. En effet, la première a donné naissance à la révolution industrielle à la fin du 18^e et au début du 19^e siècle. L'homme a alors appris à maîtriser la matière au niveau millimétrique avec des inventions comme la machine à vapeur. La deuxième révolution technologique s'est faite au milieu du 20^e siècle avec la microélectronique. L'homme fut alors en mesure de maîtriser la matière au niveau du micromètre* (un millionième de mètre). La troisième révolution technologique se produira au 21^e siècle, grâce aux nanotechnologies qui permettront à l'homme de contrôler la matière au niveau du milliardième de mètre, soit au niveau de l'atome¹³. »

Bien que l'histoire de la nanoscience et des nanotechnologies s'écrive formellement à partir de 1959 avec le discours précurseur de Richard Feynman sur l'ingénierie atomique, certains estiment que l'intérêt soulevé autour de la nanoscience et des nanotechnologies ne doit pas faire oublier que le monde nano fait partie intégrante de la nature et que de tout temps, et intuitivement, l'être humain a su exploiter les propriétés particulières de la

11. Ce chapitre constitue une synthèse très sommaire du sujet, dont l'objectif est de fournir les éléments de base nécessaires à la mise en contexte du questionnement éthique soulevé dans le présent avis. Le lecteur est invité à consulter le texte suivant pour une présentation claire et détaillée des nanotechnologies : Daniel LEBEAU, *Aperçu de la recherche sur les nanotechnologies*, Document d'information, Conseil de la science et de la technologie, Gouvernement du Québec, juin 2001 [en ligne] <http://www.cst.gouv.qc.ca>. En anglais, le rapport suivant publié en Grande-Bretagne est également suggéré : THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*, Londres, The Royal Society, juillet 2004 [en ligne] <http://www.royalsoc.ac.uk/document.asp?id=2023>.

12. CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *op. cit.*, p. i.

13. Daniel LEBEAU, *op. cit.*, p. 8.

matière à l'échelle nano (voir l'encadré). D'autres, cependant, estiment que ce type d'argument « repose sur un

sophisme philosophique » qui a pour conséquence de naturaliser la science et d'artificialiser la nature¹⁴.

Un peu d'histoire

« Le grand public doit savoir que le monde matériel dans lequel nous vivons depuis des millénaires comporte la dimension 'nano' par essence même. Particules, atomes et molécules existent depuis le début de l'Univers et en sont les constituants élémentaires. Dans le domaine 'nano' la nature est le premier maître d'œuvre pour avoir élaboré des molécules comme l'ADN ou les carotènes. Le 'nanomonde' n'est donc pas quelque chose de fondamentalement nouveau et l'on doit se souvenir qu'au temps de la préhistoire, comme à celui du moyen-âge, l'homme utilisait déjà sans le savoir des systèmes complexes nanostructurés* [...] (peintures, colorants, additifs, etc.). Par contre, les nanotechnologies, qui sont liées à une manipulation contrôlée d'objets nanométriques, ne sont apparues que récemment, lorsque les techniques permettant d'observer et de déplacer à cette échelle ont été utilisées couramment dans les laboratoires de recherche [...] Le développement des nanotechnologies est devenu explosif lorsque les potentialités d'applications ont été analysées et exploitées, montrant que les propriétés des matériaux et systèmes susceptibles d'en découler pourraient être fondamentalement différentes de celles des matériaux et systèmes de dimension macroscopique, non nanostructurés. »

Patrick BERNIER¹⁵

Quelques moments clés¹⁶

- | | |
|------|---|
| 1959 | Présentation du discours du physicien Richard Feynman, « There's plenty of room at the bottom », sur les possibilités de l'ingénierie atomique. |
| 1974 | Norio Taniguchi de l'université des Sciences de Tokyo utilise pour la première fois le terme « nanotechnology ». |

- | | |
|-------------|--|
| 1981 | Invention du microscope à effet tunnel par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer (Prix Nobel de physique en 1986) du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich, qui permet pour la première fois aux chercheurs de voir les atomes. |
| 1985 | Découverte des fullerènes (« <i>buckyballs</i> ») par Robert F. Curl Jr., Harold W. Kroto et Richard E. Smalley (Prix Nobel de chimie en 1996). |
| 1986 | Publication du livre de K. Eric Drexler, <i>Engines of Creation</i> , qui popularise les nanotechnologies. |
| 1989 | Le physicien Donald M. Eigler, chercheur chez IBM, est le premier à manipuler des atomes; il déplace 35 atomes de xénon pour écrire les lettres IBM. |
| 1991 | Sumio Iijima du laboratoire de recherche de NEC au Japon découvre les nanotubes de carbone*. |
| 1993 | Warren Robinett et R. Stanley Williams conçoivent un système de réalité virtuelle qui permet d'utiliser le microscope à effet tunnel pour manipuler les atomes. |
| 1998 | Cees Dekker et son groupe de recherche de l'Université Delft aux Pays-Bas créent le premier transistor à base de nanotubes de carbone. |
| Depuis 1990 | Ouverture de centres voués à la nanoscience et aux nanotechnologies à travers le monde (États-Unis, Japon, pays de l'Union européenne et plusieurs autres) |
| Depuis 2000 | Mise en place d'initiatives nationales en nanotechnologies dans plusieurs pays (États-Unis, Japon, Union européenne, France, Allemagne, Chine et plusieurs autres) |

14. Extrait d'une communication personnelle de Céline Lafontaine, sociologue, Université de Montréal, mai 2005 : « Non seulement ce type de formule qu'on retrouve dans grand nombre de documents publics traitant des nanos amène une certaine confusion quant à la nouveauté des nanotechnologies, mais elle repose sur un sophisme philosophique qui projette l'état actuel des connaissances à l'ensemble de l'histoire humaine. Plusieurs spécialistes des sciences sociales déplorent que ce type d'argument soit employé dans les documents publics puisqu'il participe d'une logique de "naturalisation de la science et d'artificialisation de la nature", comme il est convenu d'appeler ce phénomène. »

15. Patrick BERNIER, « Nanosciences et nanotechnologies : dimension sociétale et problèmes de santé publique », *Nanosciences et Nanotechnologies : une réflexion prospective*, mai 2005, p. 29 [en ligne] http://www.recherche.gouv.fr/mstp/nano_mstp2005.pdf.

16. Voir, entre autres, *Scientific American*, septembre 2001, p. 36.

Nanoscience et nanotechnologie : l'échelle du nanomètre

Le monde de la nanoscience et de la nanotechnologie se situe à l'échelle du nanomètre. Le préfixe *nano* vient du grec « nannos » qui veut dire nain ou très petit et fait référence au milliardième ou 10^{-9} d'une unité de mesure qui s'exprime au moyen de l'abréviation nm (pour nanomètre). Une dimension aussi petite est invisible à l'œil nu ; à des fins de comparaison, il est courant de faire référence au cheveu humain dont le diamètre varie entre 50 000 et 100 000 nanomètres.

Les objets sont considérés comme faisant partie de l'univers de la nanoscience à la condition qu'une de leurs dimensions se situe entre 1 et 100 nm. La taille des objets est importante parce que c'est généralement entre 1 et 100 nm qu'interviennent un enrichissement ou un changement dans les propriétés de la matière, un aspect fondamental des nanotechnologies. Ce seront, par exemple, une réactivité accrue (en raison d'une augmentation de la surface spécifique* de l'objet nano, et donc du rapport entre son volume et sa surface) ou l'acquisition de propriétés optiques, magnétiques, électriques, mécaniques ou biologiques attribuables à des effets quantiques qui se produisent à cette échelle (comme l'effet tunnel*) et que ne possède pas la même matière à plus grande échelle.

Enfin, un dernier point s'avère essentiel pour bien cerner l'univers des nanotechnologies, et c'est celui de l'intervention humaine dans la manipulation et le contrôle de la matière à l'échelle nanométrique afin de créer des nanostructures qui pourront être intégrées à des structures à plus large échelle dans la mise au point de produits nanotechnologiques.

Ces trois caractéristiques – la taille, de nouvelles propriétés et le contrôle de la matière – sont intégrées dans la définition très longue des nanotechnologies adoptée par la National Science Foundation aux États-Unis et reprises par la National Nanotechnology Initiative¹⁷. La Commission les retient également pour la définition des termes « nanoscience » et « nanotechnologie » tels qu'ils seront compris dans le présent avis.

La **nanoscience** est l'étude scientifique, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures moléculaires dont au moins une de leurs dimensions mesure entre 1 et 100 nanomètres, dans le but de comprendre leurs propriétés physicochimiques particulières et de définir les moyens à utiliser pour les fabriquer, les manipuler et les contrôler. Dans un sens plus général, le terme nanoscience peut désigner l'ensemble des recherches qui s'intéressent à toute structure de la matière qui comporte au moins une dimension nanométrique, sans que ces études visent nécessairement la fabrication d'objets ou de matériaux utilisables dans différents domaines.

Découlant de la nanoscience, la **nanotechnologie** est la conception et la fabrication, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures qui comportent au moins une dimension mesurant entre 1 et 100 nanomètres, qui possèdent des propriétés physicochimiques particulières exploitables, et qui peuvent faire l'objet de manipulations et d'opérations de contrôle. Les résultats de certaines recherches effectuées sur le comportement des particules ultrafines* (issues des émissions des moteurs diesels¹⁸, par exemple) accidentellement projetées dans l'air, dont les dimensions se situent à cette échelle, peuvent être utilisés en nanotechnologie pour mieux comprendre celui des nanoparticules conçues et fabriquées en laboratoire.

17. La NNI est un programme multi-agences du gouvernement américain qui a pour but d'accélérer la découverte, le développement et le déploiement de la science, du génie et de la technologie à l'échelle nanométrique. Sa définition de « nanotechnologie » est la suivante : « Research and technology development at the atomic, molecular or macromolecular levels, in the length scale of approximately 1-100 nm range, to provide a fundamental understanding of phenomena and materials at the nanoscale and to create and use structures, devices and systems that have novel properties and functions because of their small and/or intermediate size. The novel and differentiating properties and functions are developed at a critical length scale of matter typically under 100 nm. Nanotechnology research and development includes manipulation under control of the nanoscale structures and their integration into larger material components, systems and architectures. Within these larger scale assemblies, the control and construction of their structures and components remains [sic] at the nanometer scale. In some particular cases, the critical length scale for novel properties and phenomena may be under 1 nm (e.g., manipulation of atoms at ~0.1 nm) or be larger than 100 nm (e.g., nanoparticle reinforced polymers have the unique feature at ~200-300 nm as a function of the local bridges or bonds between the nano particles and the polymer) ». Voir National Nanotechnology Initiative [en ligne] <http://www.nano.gov>.

18. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé reliés aux nanoparticules*, Claude OSTIGUY et collaborateurs, Rapport R-451, Études et recherches, Gouvernement du Québec, mars 2006, p. 1 [en ligne] http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100185.html.

La distinction entre nanoscience et nanotechnologie repose donc essentiellement sur une différenciation conceptuelle entre science et technologie. Dans la documentation consultée, la Commission note d'ailleurs que ces deux termes ne font pas nécessairement l'objet d'une utilisation distincte et reconnaît qu'il n'est pas toujours facile, ni essentiel, de distinguer science et technologie dans ce secteur. C'est pourquoi le terme nanotechnologie est souvent utilisé de façon générique dans la suite du texte. La forme plurielle semble aussi plus courante, vraisemblablement en raison de la diversité des applications et des domaines dans lesquels des manipulations se font à l'échelle du nanomètre.

Comme le soulignait le Conseil de la science et de la technologie dans son avis de 2001¹⁹, et comme l'ont fait d'autres auteurs depuis²⁰, la prudence s'impose dans la définition de ces termes. Il faut éviter qu'elle soit si large qu'elle puisse englober toute recherche ou application technologique dans la dimension microscopique. Les expressions comportant le préfixe « nano » sont très à la mode en ce moment et constituent généralement un détournement de sens – les blocs de construction « nanos » ou le « nano iPod », par exemple, n'ont rien à voir avec la technologie nanométrique. Si cet usage abusif a somme toute peu d'importance quand il s'agit de marketing ou de publicité, il en va autrement sur le plan de la recherche. En effet, l'investissement public gagne en importance dans le financement de la recherche en nanoscience et en nanotechnologie ; or, la tentation d'accoler le préfixe « nano » aux projets dans le but d'augmenter les chances de financement, qui est présente dans le monde de la recherche, peut nuire au développement du secteur.

Aspects marquants à considérer : une prémisse au questionnement éthique

Pour mieux comprendre l'univers des nanotechnologies, leurs particularités méritent d'être rappelées et précisées :

l'échelle nanométrique, les propriétés nouvelles de la matière à cette échelle, la manipulation de la matière, la multidisciplinarité et la convergence disciplinaire des nanotechnologies, l'engouement mondial pour les nanotechnologies. Dans certains cas, ces aspects marquants du domaine servent de fondement au questionnement éthique qui sera amorcé dans les prochains chapitres.

La taille d'un composant nanométrique

Parce qu'il faut des appareils expressément conçus pour travailler à l'échelle du nanomètre afin d'explorer le nanomonde et de procéder à la manipulation d'atomes ou de molécules – comme le microscope à effet tunnel (pour les matériaux conducteurs) ou le microscope à force atomique* (pour les matériaux isolants)²¹ –, le nanomonde et ses composants restent dans l'univers de l'invisible et de l'indélectable en dehors des installations de recherche et de fabrication industrielle. Toute opération de contrôle relative à la présence de composants nanométriques dans des produits ou dans un environnement donnés ne peut donc se faire que dans des conditions spécifiques, et les moyens de protection utilisés à ce jour pour contrer l'inhalation, l'ingestion ou l'absorption par la peau, ou pour éviter des rejets de nanoparticules dans l'environnement, ne sont plus nécessairement appropriés et efficaces²².

Les propriétés nouvelles de la matière nanométrique

Avec l'augmentation du rapport volume/surface et l'accroissement de la surface spécifique qui en découle, de nouvelles propriétés de la matière apparaissent à l'échelle nanométrique : par exemple, le nickel devient aussi dur que l'acier, une substance auparavant soluble devient insoluble, la conductivité du cuivre diminue et celle du carbone augmente, les propriétés thermiques des matériaux changent, certaines substances changent de couleur, d'autres deviennent réactives, etc. La recherche et la découverte de ces nouvelles propriétés constituent

19. CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *op. cit.*

20. Dont ACADÉMIE DES SCIENCES ET ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (France), *Nanosciences – Nanotechnologies*, Rapport sur la science et la technologie n° 18, Paris, avril 2004 [en ligne] http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST18.htm ; OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES (France), *Nanoscience et progrès médical*, Rapport de Jean-Louis LORRAIN et Daniel RAOUL, 6 mai 2004 ; THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*

21. MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France), *À la découverte du nanomonde*, Paris, 2003, p. 18-19 [en ligne] <http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/docs/plaq.nanomonde.pdf>.

22. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 76.

un élément clé de l'intérêt pour les nanotechnologies et l'innovation technologique qui peut en résulter dans de nombreux secteurs d'activité.

Toutefois, ces nouvelles caractéristiques de la matière à l'échelle nanométrique créent un contexte où règnent l'inconnu et l'incertitude. À moins de 50 nm, la matière suit les lois de la physique quantique* et non plus celles de la physique classique, et certaines de ses propriétés, comme le magnétisme ou la conductivité, peuvent changer radicalement. En raison de leur taille, les nanoparticules peuvent devenir plus toxiques, puisqu'elles peuvent ainsi être absorbées plus facilement par les organismes vivants²³. Inévitablement, ces nouvelles propriétés soulèvent la question de l'identification, de l'évaluation et de la gestion des risques (avérés ou hypothétiques) qu'elles pourraient entraîner, de la conception d'un produit nanométrique jusqu'à son élimination.

La manipulation de la matière

Pour la fabrication de matériaux ou d'objets à l'échelle nanométrique, deux approches sont utilisées : l'approche descendante*, actuellement la plus courante, et l'approche ascendante*, une technique en progression.

L'**approche descendante** (*top-down*) consiste à réduire progressivement la taille d'un matériau existant, en le découpant ou en le sculptant (par usinage ou par gravure), jusqu'à ce qu'il possède les dimensions et les caractéristiques voulues. Pour utiliser une comparaison, disons que c'est comme sculpter une statue à partir d'un bloc de marbre en utilisant un marteau et un ciseau.

La microélectronique utilise cette approche depuis une cinquantaine d'années, notamment au moyen de la photolithographie*. Appréciée pour sa fiabilité et la complexité qu'elle permet d'atteindre, cette approche requiert généralement un apport énergétique important et produit plus de déchets que l'approche ascendante²⁴.

L'**approche ascendante** (*bottom-up*) consiste à assembler les composants nanométriques à partir des éléments de base de la matière, atome par atome ou molécule par molécule, jusqu'à l'obtention d'une structure complète capable de s'intégrer dans un ensemble plus grand. Cette approche suppose l'assemblage contrôlé de petites sous-unités (atomes ou molécules) en une structure plus grande et fonctionnelle. C'est comme fabriquer la statue de l'exemple de l'approche descendante, mais en empilant des blocs de matière.

Depuis quelques milliards d'années, la nature construit le monde du vivant à partir de systèmes nanométriques qui fonctionnent selon l'approche ascendante et fournit d'excellents exemples d'autoassemblage* dont souhaite s'inspirer la fabrication nanotechnologique²⁵. L'autoassemblage tel qu'il est pratiqué dans la nature n'est cependant pas la seule voie possible d'une approche ascendante²⁶. Il est aussi possible de construire des objets en utilisant des microscopes en champ proche* qui vont saisir les atomes (ou les molécules) un à un pour les assembler selon la forme voulue.

Ces deux approches, ascendante et descendante, ont leurs avantages et leurs inconvénients. Avec l'approche descendante, il faut créer des objets de plus en plus petits avec de plus en plus de précision, alors que pour l'approche ascendante il faut s'assurer de contrôler assez bien les paramètres de manipulation pour construire des unités suffisamment grosses pour être utilisables dans le monde macroscopique.

L'approche ascendante, notamment en ce qui a trait à l'autoassemblage, soulève des craintes populaires (et parfois scientifiques) à l'égard de l'autoréplication* de composants nanométriques qui pourrait en découler.

23. MERIDIAN INSTITUTE, *Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks. Closing the Gaps within and between Sectors of Society*, janvier 2005, p. 8 [en ligne] <http://www.nanoandthepoor.org>. Voir aussi, entre autres, SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *Opinion on the appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*, European Commission, septembre 2005 [en ligne] <http://files.nanobio-raise.org/Downloads/scenihhr.pdf>; SWISS RE, *Nanotechnology. Small Matter, Many Unknowns*, Annabelle HETT et al., Swiss Reinsurance Company, Risk perception series, Suisse, 2004 [en ligne] <http://swissre.com>; J. Clarence DAVIES, *Managing the Effects of Nanotechnology*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, Washington, D.C., 27 janvier 2006 [en ligne] <http://www.wilsoncenter.org/events/docs/Effectsnanotechfinal.pdf>.

24. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 28.

25. MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES, *op. cit.*, p. 3.

26. Pour plus de détails, voir THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 26-28.

La multidisciplinarité et la convergence disciplinaire

Des spécialistes de diverses disciplines mettent déjà à profit les nanotechnologies dans leur domaine de recherche. Par exemple, un biologiste utilisera des nanoparticules ferromagnétiques fabriquées par le chimiste dans la recherche d'un nouveau traitement contre le cancer, le physicien se servira de l'ADN pour filtrer des nanotubes de carbone et le chimiste utilisera la microscopie en champ proche* développée par le physicien pour observer ses molécules synthétiques. Chacun contribue ainsi au progrès de la recherche dans sa propre discipline et, par voie de conséquence, dans le vaste secteur des nanotechnologies. D'où la difficulté de nommer les réalités du domaine et d'en arriver à l'établissement d'une nomenclature suffisamment claire et précise pour se prêter à la mise en place de normes en matière de protection de la santé et de l'environnement.

La multidisciplinarité du domaine et le vaste potentiel des nanotechnologies rendent possible la convergence des disciplines qui sont engagées dans le développement et l'utilisation des nanotechnologies. Par exemple, la mise au point de capteurs* nanométriques et leur utilisation dans le domaine des technologies de l'information et de la communication pourraient donner lieu à des mesures de sécurité et de surveillance accrues, à des

soins de santé personnalisés, à la traçabilité des produits de consommation et à l'établissement de profils de consommation²⁷. La convergence éventuelle des nanotechnologies avec la biotechnologie, les sciences de l'information et les sciences cognitives (*nano-bio-info-cogno/NBIC*²⁸) soulève aussi des inquiétudes quant à l'utilisation qui pourrait en être faite pour transformer l'être humain à l'aide de la technologie²⁹.

Un engouement généralisé

Dans les années 1990, les premiers instituts ou centres voués à divers aspects de la nanoscience ont vu le jour aux États-Unis et au Japon. Depuis 2000, des initiatives nationales sont nées ailleurs dans le monde afin de favoriser l'émergence d'une industrie locale et de se doter d'un avantage concurrentiel. Des sommes considérables y sont consacrées, ainsi que l'illustre le tableau ci-dessous.

Toutefois, ces données concernent essentiellement les investissements relatifs aux stratégies nationales mises en œuvre dans les pays mentionnés; elles excluent d'office les investissements qui sont faits par divers États américains (un milliard de dollars américains pour la seule ville d'Albany dans l'État de New York), par exemple, et ne permettent pas d'inclure les investissements publics

Estimation des investissements réalisés en recherche et développement par les gouvernements centraux, selon la National Science Foundation (en M\$ US)

Région	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Europe	126	151	179	200	~225	~400	~650	~950	~1 050
Japon	120	135	157	245	~465	~720	~800	~900	~950
États-Unis	116	190	255	270	465	697	862	989	1 081
Autres régions	70	83	96	110	~380	~550	~800	~900	~1 000
Total	432	559	687	825	~1 535	~2 350	~3 100	~3 700	~4 100

Source : Mihail C. Roco, National Science Foundation³⁰.

27. *Ibid.*, p. x.

28. Voir, entre autres, Mihail C. Roco et William Sims BAINBRIDGE (dir.), *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*, National Science Foundation, Arlington, Virginia, juin 2002 [en ligne] http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf; W. BIBEL (dir.), *Converging Technologies and the Natural, Social and Cultural World*, Special Interest Group Report for the European Commission via an Expert Group on Foresighting the New Technology Wave, 26 juillet 2004 [en ligne] http://ec.europa.eu/research/conferences/2004/ntw/pdf/sig4_en.pdf.

29. Dans la foulée du courant philosophique transhumaniste qui prône « le droit moral, de ceux qui le désirent, de se servir de la technologie pour accroître leurs capacités physiques, mentales ou reproductives et d'être davantage maîtres de leur propre vie [...] en transcendant [leurs] limites biologiques actuelles », voir « La déclaration transhumaniste » de la WORLD TRANSHUMANIST ASSOCIATION [en ligne] <http://transhumanism.org/index.php/WTa/more/148>.

30. Tiré de Mark ROSEMAN, *An Overview of Nanotechnology in Canada. Report 2: A Review and Analysis of Foreign Nanotechnology Strategies*, developed for the Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (PMACST), Canada, 14 octobre 2005, p. 2 et 3 [disponible sur demande] http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html. Les totaux ont été arrondis pour les montants approximatifs.

réalisés au Canada en l'absence d'une stratégie nationale en matière de nanotechnologies. À noter qu'une telle stratégie était prévue pour la fin de 2005³¹ et devrait donc être mise en œuvre bientôt. Pour le moment, il est difficile de tracer un portrait quantitatif de l'investissement canadien relatif aux nanotechnologies. En grande partie, l'infrastructure nécessaire au développement des nanotechnologies est logée dans les universités³²; les sommes sont attribuées à la recherche universitaire à l'intérieur des budgets des organismes subventionnaires nationaux (comme le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada [CRSNG] et les Instituts de recherche en santé du Canada [IRSC]), et le caractère multidisciplinaire du domaine ne permet pas d'avoir une vue d'ensemble sur les subventions consacrées aux nanotechnologies. À titre indicatif, signalons qu'une recherche réalisée sur le sujet en 2004³³ évalue à environ 200 millions de dollars canadiens l'effort consenti annuellement en nanotechnologies avec les budgets du CRSNG (subventions d'équipes et individuelles).

Avec 38,6 % des entreprises canadiennes en nanotechnologies, le Québec occupe une place enviable dans ce domaine au Canada³⁴. La création de NanoQuébec en 2001 lui confère un rôle de leader dans la promotion des nanotechnologies pour accroître le développement économique du pays.

Marginale dans les années 1990, la recherche en nanoscience et en nanotechnologies fait maintenant partie intégrante des programmes de formation³⁵ et de recherche de tous les établissements universitaires; des entreprises privées (PME souvent issues du milieu universitaire) sont aussi de plus en plus présentes. Les domaines de recherche sont variés et se situent dans les quatre grands secteurs qui seront considérés ci-dessous : nanomatériaux, nanoélectronique, nanobiotechnologie et nanométrie. Le financement de la recherche au Québec est surtout public. Les principaux bailleurs de fonds demeurent les

gouvernements et leurs organismes subventionnaires traditionnels, tels que le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ou les Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC) et le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) au Québec. Le CRSNG a d'ailleurs mis en place une plate-forme d'innovation en nanoscience et en nanotechnologie (NanoPIC³⁶) dont la mission est d'accélérer et d'intensifier la recherche en plus de faciliter la formation de personnes qualifiées en la matière. Ce réseau national et multidisciplinaire, dont la direction loge à l'université McGill, regroupe des chercheurs universitaires des secteurs de l'ingénierie et de la science et finance des projets à hauts risques financiers.

Enfin, il importe de souligner que les projets associés au développement et à l'exploitation des nanotechnologies ne sont pas réservés aux pays développés; des pays comme la Chine, l'Inde, l'Afrique du Sud et les pays de l'ancien bloc de l'Est se sont aussi dotés de programmes consacrés spécifiquement aux nanotechnologies. Cette présence de plus en plus forte de la recherche en nanotechnologies partout dans le monde permet d'espérer que les besoins des pays moins développés seront également pris en considération dans la mise au point de solutions adaptées aux besoins particuliers de ces pays et que ceux-ci ne seront pas exclus des bénéfices attendus de la recherche.

Cet effort planétaire de recherche débouchera inévitablement sur une diversité d'applications qui pourront avoir des retombées bénéfiques, mais dont les effets sur la santé des consommateurs, des chercheurs et des travailleurs, sur l'environnement, sur l'organisation du travail, voire sur le devenir de l'espèce humaine devront être pris en considération. Des interventions locales seront-elles suffisantes ou faudra-t-il que des instances de contrôle et de surveillance internationales soient mises en place? Qu'en est-il de ces préoccupations sur la scène internationale?

31. Voir http://www.infoexport.gc.ca/science/india_techsummit_thprof-fr.htm.

32. David J. ROUGHLEY, Victor JONES et Aaron CRUIKSHANK, *An Overview of Nanotechnology in Canada. Report 3: The Canadian Industrial Capacity to Absorb Nanotechnology*, developed for the Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (PMACST), Canada, 31 octobre 2005, p. 13 [disponible sur demande] http://acst-cst.gc.ca/back/home_f.html.

33. Peter GRÜTTER et Mark ROSEMAN, *A Study of Canadian Academic Nanoscience Funding: Review and Recommendations*, NSERC/CRSNG NanoIP/PIC, juin 2004 [en ligne] http://www.physics.mcgill.ca/NSERCnanoIP/e/Canada_Nano_Funding.pdf.

34. Pour une présentation détaillée sur le sujet, voir David J. ROUGHLEY *et al.*, *op. cit.* Des annexes offrent aussi de l'information sur les brevets, les entreprises et la recherche selon les différentes provinces canadiennes.

35. Des programmes de formation technique existent également dans quelques cégeps du Québec.

36. NanoPIC, *La plate-forme d'innovation du CRSNG en nanoscience et en nanotechnologie*, 2005 [en ligne] <http://www.physics.mcgill.ca/NSERCnanoIP/f/>.

Les grands secteurs d'intervention

À l'instar de l'électricité et de l'électronique, la nanoscience et les nanotechnologies toucheront toutes les sphères de la vie courante. Les applications qui en découlent déjà ou qui pourraient en résulter dans les années à venir – à court, moyen ou long terme – sont aussi diversifiées qu'il est possible de l'imaginer, parfois déroutantes, souvent fascinantes, dans certains cas préoccupantes. Les quatre grands secteurs de recherche et d'innovation qui jouent actuellement un rôle majeur dans le domaine des nanotechnologies sont les nanomatériaux, la nanoélectronique, la nanobiotechnologie (et la nanomédecine) et la nanométrie.

Les nanomatériaux

Un **nanomatériau** est constitué de particules de matière dont la taille comporte au moins une dimension pouvant varier entre 1 et 100 nanomètres, qui lui permet d'acquérir des propriétés particulières. Des nanomatériaux ayant une seule dimension nanométrique sont les films ou les couches minces et les surfaces nanostructurées dont seulement l'épaisseur est nanométrique. Les nanofils* et les nanotubes, qui ont un diamètre inférieur à 100 nm mais qui ont une longueur pouvant atteindre plusieurs centaines de micromètres, sont des nanomatériaux à deux dimensions. Enfin, les nanoparticules, les nanopoudres, les fullerènes et les nanocristaux (ou points quantiques) sont des nanomatériaux dont toutes les dimensions sont à l'échelle nanométrique³⁷.

Les nanomatériaux sont produits selon deux grandes approches qui ont été présentées plus haut : l'approche descendante et l'approche ascendante. À l'intérieur de ces deux approches, différentes techniques de manipulation de la matière sont utilisées en fonction de la nature du produit recherché. Dans l'approche descendante, des techniques s'appuyant sur les procédés de la lithographie* sont utilisées, notamment dans le domaine de l'électronique pour produire des puces électroniques, par exemple ; dans le domaine de l'op-

tique, les technologies de précision qui font appel au découpage, à la gravure et à l'abrasion permettent de produire des pièces de haute précision. Dans l'approche ascendante, divers processus peuvent être utilisés : des processus de synthèse chimique qui produisent des matériaux bruts comme les nanoparticules utilisées dans les cosmétiques, la peinture et autres produits, des processus d'autoassemblage ou d'auto-organisation* qui produisent les nanocristaux, nanofilms et nanotubes, entre autres pour la fabrication d'écrans, et des processus d'assemblage positionnel* qui, de façon expérimentale, visent la manipulation et le positionnement un par un d'atomes et de molécules pour créer une structure³⁸.

Qu'il s'agisse de la nanoscience ou des nanotechnologies, « les limites de chaque domaine sont confondues et toujours floues. Dans ce contexte, les nanomatériaux représentent le dénominateur commun de tous les sous-domaines. Ils sont d'une grande importance, non seulement en tant que nouvelles couches et matériaux conducteurs en nanoélectronique, mais aussi en tant que matériaux capteurs en nanobiotechnologie³⁹. » Dans l'état actuel du développement de la recherche et des technologies, les nanomatériaux sont principalement intégrés à des produits existants pour en améliorer certaines caractéristiques ou leur en donner de nouvelles. C'est le cas, par exemple, pour des produits comme les écrans solaires transparents, les cosmétiques qui pénètrent plus profondément dans la peau, les pneus plus résistants, les balles de tennis qui durent plus longtemps et offrent de meilleures propriétés de rebond, les peintures qui protègent contre la corrosion, les verres antiéblouissement, les pansements antibactériens, les tissus infroissables, etc.⁴⁰ (voir aussi l'encadré). À moyen ou à long terme, cependant, l'utilisation des nanomatériaux vise des objectifs beaucoup plus ambitieux, notamment dans des domaines comme l'énergie et l'environnement. Les nanomatériaux font également partie intégrante du développement de la recherche et de nouvelles applications nanotechnologiques dans les domaines de l'électronique et de la santé, présentés dans les prochaines sections.

37. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 7.

38. *Ibid.*, p. 25-30.

39. AMBASSADE DE FRANCE EN ALLEMAGNE, *Les nanotechnologies en Allemagne*, Domaines des nanomatériaux et de la nanoélectronique, octobre 2005, p. 9 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_085.htm.

40. Voir, entre autres, SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, Stéphane BERGERON et Éric ARCHAMBAULT, pour le compte d'Environnement Canada, mars 2005, p. 2 [en ligne] http://www.science-metrix.com/pdf/SM_2004_016_EC_Report_Stewardship_Nanotechnology_Environment.pdf et EUROPEAN COMMISSION. COMMUNITY HEALTH AND CONSUMER PROTECTION, *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis...*, 2004, p. 138 [en ligne] http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm.

Utilisations possibles des nanomatériaux

« [Les] propriétés de résistance mécanique des nanomatériaux pourront être exploitées dans des secteurs aussi divers que les matériaux de construction pour le bâtiment, les appareils électroménagers et les appareils médicaux. Les moyens de transports terrestres, maritimes, aériens et spatiaux fabriqués avec des nanomatériaux seront plus légers, emporteront plus de charge utile, consommeront moins d'énergie et seront donc moins polluants pour l'environnement.

En outre, les nanoparticules ont une autre propriété intéressante du fait de leurs petites dimensions: un excellent rapport surface/volume. Il permettra d'augmenter l'efficacité des catalyseurs, utilisés notamment dans le raffinage du pétrole et dans l'industrie des engrais, mais aussi de l'absorption des polluants (au moyen des filtres antipollution et des pots catalytiques des véhicules) et du stockage de l'hydrogène (carburant de la pile à combustible* des voitures électriques). »

MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE
ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France)⁴¹

La nanoélectronique

La nanoélectronique concerne l'étude, la conception, la fabrication et l'utilisation de circuits ou de composants électroniques, qui sont assemblés à partir d'éléments dont les dimensions se situent à l'échelle nanométrique, en vue d'en exploiter les propriétés physiques particulières. L'optoélectronique* et les technologies de l'information et de la communication (TIC) font partie du domaine. Il convient de souligner qu'il y a actuellement des chevauchements entre l'innovation à l'échelle microscopique et à l'échelle nanométrique qui rendent difficile l'identification de l'innovation spécifiquement nanotechnologique en électronique.

Historiquement, l'électronique a toujours cherché à améliorer les performances des composants électroniques en les miniaturisant de façon constante. La microélectronique actuelle est fondée principalement sur l'utilisation du silicium et devrait atteindre ses limites en 2018. En effet, selon la « loi » de Moore*, voulant

que le nombre de composants sur une surface donnée double environ tous les 18 mois⁴², la miniaturisation ne pourra être poussée plus loin dans cette voie et devra s'orienter vers des technologies hybrides comme celle des polymères* conducteurs⁴³.

Pour remplacer la lithographie utilisée jusqu'à maintenant pour fabriquer des circuits électroniques, différentes technologies réalisées à l'échelle nanométrique sont expérimentées, par exemple la lithographie par rayons X⁴⁴, la lithographie par ultraviolets extrêmes* et la lithographie par projection de faisceau d'électrons*. L'utilisation de l'électronique moléculaire* (voir l'encadré) ou des nanotubes de carbone est également envisagée pour atteindre les performances recherchées.

L'électronique moléculaire

« Un domaine de recherche qui attire beaucoup l'attention actuellement est l'électronique moléculaire, car des résultats encourageants et fort prometteurs ont été obtenus récemment. Si les résultats attendus se concrétisent, il sera possible de construire des ordinateurs d'une façon totalement différente des techniques actuelles de lithographie. Plusieurs chercheurs travaillent donc présentement à l'utilisation de molécules chimiques et biologiques comme composants des ordinateurs. Ces molécules serviraient notamment de transistors, le composant de base de tout ordinateur.

[...]

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

41. *Op. cit.*, p. 28.

42. Voir, entre autres, SWISS RE, *op. cit.*, p. 39.

43. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 17.

44. Voir Daniel LEBEAU, *op. cit.*, p. 24-40.

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

Daniel LEBEAU⁴⁵

La nanobiotechnologie et la nanomédecine

À l'instar d'autres auteurs⁴⁶ dans la documentation consultée pour la préparation du présent avis, le Conseil de la science et de la technologie, dans son propre avis sur les nanotechnologies, signalait la difficulté de définir ce domaine des nanotechnologies, notamment en raison de sa multidisciplinarité, mais aussi parce que la biotechnologie travaille déjà à l'échelle nanométrique avec les molécules d'ADN et les virus⁴⁷. Selon le Conseil, « un critère important concerne l'utilisation de nanomatériaux ou encore la création de nouveaux instruments ou appareils fonctionnant à l'échelle nanométrique, dans le champ de la biotechnologie. En fait, il s'agit d'un champ faisant appel aux microtechnologies et aux méthodes traditionnelles de la chimie synthétique moléculaire⁴⁸. »

Bref, il s'agit d'un domaine dans lequel les techniques de la nanotechnologie sont utilisées pour développer des outils permettant de manipuler ou d'étudier des organismes vivants, de se servir de ces organismes ou de s'inspirer des mécanismes de leur fonctionnement pour fabriquer, à l'échelle nanométrique, des matériaux ou des dispositifs nouveaux aux propriétés particulières. La nanobiotechnologie trouve des applications importantes dans le domaine de l'imagerie biologique* et elle définit

des techniques qui sont utilisées pour la fabrication de biopuces*, de laboratoires sur puce* et de biocapteurs*. Au carrefour de la chimie, de la biologie et de la physique, les principales applications de la nanobiotechnologie sont en grande partie dans le domaine de la santé, mais aussi en environnement, en agriculture et en alimentation.

La nanométrie

Il ne peut y avoir de développement de la nanoscience ni d'applications nanotechnologiques sans l'apport d'une instrumentation adéquate; les progrès théoriques et pratiques à l'échelle nanométrique sont intimement liés aux progrès de cette instrumentation⁴⁹. D'où l'importance de la nanométrie, qui étudie les mesures liées aux structures nanométriques ou aux phénomènes physiques pouvant se produire à l'échelle nanométrique et qui concerne également les appareils de mesure utilisés pour l'évaluation des grandeurs en cause.

La nanométrie permet d'assurer l'exploration du nanomonde et la conception de produits qui découlent de l'exploitation des nanotechnologies. Outre les mesures de longueur à l'échelle nanométrique, la nanométrie comprend aussi la mesure des forces, de la masse, ainsi que des diverses propriétés de la matière (optiques, électriques, magnétiques, chimiques, etc.) à cette même échelle⁵⁰. Ses apports sont essentiels pour mesurer l'exposition aux nanoparticules sur les lieux de travail, procéder aux évaluations de toxicité des produits nanométriques et établir des normes internationales pour le dimensionnement et la caractérisation* de la matière à l'échelle nanométrique⁵¹.

La normalisation joue un rôle important dans l'analyse des risques et le contrôle de la qualité. Or, il n'existe pas de normes à l'échelle nanométrique pour le moment. L'absence de calibrage autorisant des mesures officiellement reconnues non seulement nuit à la réplication, sur les plans scientifiques et technologiques, de résultats

45. *Ibid.*, p. 32, 34, 35.

46. Entre autres, OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES (France), *op. cit.*, qui signale que « la lecture de différents auteurs montre d'ailleurs qu'aujourd'hui aucune définition consensuelle n'existe. Certains y voient d'ailleurs un stigmate caractéristique d'une discipline en cours de naissance ou en plein devenir », p. 23.

47. CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *op. cit.*, p. 17.

48. *Ibid.*

49. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 13.

50. *Ibid.*, p. 13-16.

51. *Ibid.*, p. 76.

obtenus par un laboratoire ou par une firme, mais empêche aussi l'établissement d'exigences réglementaires en matière de santé et de sécurité⁵². À titre d'exemple, il n'existe pas encore de procédures normalisées pour mesurer la taille des nanoparticules, un élément qui s'avère important étant donné que, selon leur dimension, les particules pénétreront plus ou moins profondément dans le corps et que leurs voies de pénétration dans l'organisme seront plus ou moins nombreuses (voies respiratoires, peau, réseau sanguin, etc.). C'est donc dire que, pour un même échantillon, la mesure obtenue pourra différer selon la technique utilisée et que, par voie de conséquence, la détermination (ou la caractérisation) des propriétés du matériel nanotechnologique utilisé pourra elle aussi être différente. La nanométrie s'avère donc essentielle pour uniformiser les mesures effectuées et en assurer la réplication. Aux États-Unis, le National Institute of Standard and Technology (NIST) poursuit des travaux dans cette voie afin d'établir des procédures et des échantillons uniformes.

L'appareillage utilisé en nanométrie s'appuie principalement sur la microscopie en champ proche, comme le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique, ainsi que sur la microscopie électronique (balayage et transmission). D'autres techniques sont fondées sur l'utilisation des rayons laser, des rayons X ou sur l'absorption de gaz. L'industrie des semi-conducteurs fait grand usage de la nanométrie, notamment pour le contrôle de la qualité des produits. En chimie, en optique et en biologie, l'appareillage nanométrique s'avère également essentiel pour tous les travaux devant se réaliser à l'échelle nanométrique.

Des attentes et des préoccupations à considérer

Sans doute plus encore que d'autres technologies apparues depuis la dernière moitié du 20^e siècle – dont les technologies de l'information et de la communication et les biotechnologies –, les nanotechnologies sont porteuses d'une multitude de promesses et suscitent bien des espoirs. Par ailleurs, leur caractère nouveau et l'ampleur

des possibilités qu'elles laissent entrevoir en matière d'innovation technologique inspirent des craintes plus ou moins raisonnables qui sont en grande partie alimentées par la littérature et le cinéma. Si ces craintes ne sont pas nécessairement fondées, ces nouvelles technologies n'en soulèvent pas moins un certain nombre d'interrogations et un questionnement d'ordre éthique quant aux risques (avérés ou hypothétiques) qu'elles peuvent entraîner, notamment pour la santé et l'environnement, mais aussi sur d'autres plans.

Un aperçu des bénéfices escomptés

L'annexe 1 fournit une bonne synthèse des bénéfices que pourraient rapporter les nanotechnologies dans de nombreux secteurs d'activité si les recherches donnent les résultats escomptés. Quelques précisions dans des domaines jugés plus importants au regard d'un questionnement éthique viennent compléter ou préciser ce portrait dans les paragraphes qui suivent et concernent la santé, l'environnement, les technologies de l'information, l'agriculture et l'alimentation. La Commission y ajoute, à l'occasion, quelques exemples de travaux qui se font actuellement au Québec et qui sont en lien avec le sujet abordé.

Dans le domaine de la santé

Si leurs promesses se réalisent, les nanotechnologies auront un impact sur toutes les facettes de la médecine : améliorer le diagnostic, mieux soigner, compenser les handicaps acquis ou congénitaux⁵³.

*Améliorer le diagnostic*⁵⁴ – Les avancées dans ce domaine seraient parmi les plus évidentes et quelques applications pourraient être disponibles bientôt, notamment : la fabrication de puces à ADN*, utilisées en laboratoire pour le diagnostic génétique ; des laboratoires sur puce* (*lab on a chip*) qui réduiraient à quelques secondes l'analyse d'échantillons de tissus ou de fluides humains⁵⁵, laquelle demande aujourd'hui des heures, voire des jours ; des capsules qui circuleraient à l'intérieur du corps humain à des fins de diagnostic ou pour y installer des capteurs pouvant transmettre de l'information sur l'état

52. *Ibid.*, p. 13.

53. OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 17-29.

54. *Ibid.* ainsi que, entre autres, AMBASSADE DE FRANCE AUX ÉTATS-UNIS, *SCIENCES PHYSIQUES*. Nanoscience, microélectronique, matériau, n° 04, juin 2003 et THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 19-23.

55. Comme le nouveau test de fertilité pour les hommes qui permet l'autodiagnostic ; voir le site de Pria Diagnostics [en ligne] <http://www.priadi.com> et l'information relative au *Element™ Male Fertility Test*.

des tissus ou des organes; l'utilisation de marqueurs nanotechnologiques permettant de détecter, grâce aux techniques d'imagerie magnétique, des cellules malades ou des perturbations dans le fonctionnement biologique⁵⁶. Le développement de tels vecteurs nanométriques utilisant des nanoparticules ou des points quantiques a pris une grande ampleur au cours des dernières années, et cette technologie pourrait permettre de détecter les signes avant-coureurs d'une maladie – c'est-à-dire bien avant que les premiers symptômes se manifestent – et l'apparition de tumeurs malignes à un stade précoce. Des caméras microscopiques insérées dans une gélule sont déjà utilisées pour effectuer des endoscopies* de l'intestin grêle; les nanotechnologies pourraient permettre de réduire considérablement la taille du mécanisme et d'en faire usage pour la mesure de la température, de la pression artérielle, etc., en y introduisant des biocapteurs⁵⁷. Il est aussi question d'utiliser des nanoperles de carbone* pour fabriquer un tube de rayons X miniature qui pourrait également servir aux endoscopies⁵⁸.

Mieux soigner – La vectorisation* et l'activation* des médicaments à volonté, et à distance, constitueraient une avancée majeure dans le traitement de la maladie, et plus particulièrement du cancer⁵⁹. En effet, comme le soulignent les auteurs d'un rapport français déjà cité: «... un médicament ne vaut que par sa capacité à atteindre sa cible, c'est-à-dire être présent à la bonne concentration au bon endroit. [...] le médicament idéal ne s'égèrerait pas dans les méandres du corps, se diluant et donc perdant en partie de son activité⁶⁰». Actuellement, la quantité réelle de médicament qui atteint la cible visée est de l'ordre de une à dix parties par cent mille, le reste se répandant dans l'organisme et créant les effets secondaires bien connus,

notamment en chimiothérapie. Grâce à l'insertion d'un médicament dans une capsule de quelques nanomètres de diamètre, qui pourrait être porteuse de nanoparticules magnétiques guidées «de l'extérieur de l'organisme par l'application d'un champ magnétique focalisé sur la zone à traiter⁶¹» – l'imagerie par résonance magnétique* (IRM), le laser ou les rayons X pourraient jouer ce rôle –, il pourrait être possible d'atteindre directement la cible visée et d'activer la libération du médicament en temps opportun (par suite d'une programmation électronique à cet effet)⁶². En raison de la capacité qu'ont les nanoparticules de traverser la barrière hémato-encéphalique*, leur utilisation présente également un intérêt important dans le traitement des maladies d'origine neurologique, comme la maladie de Parkinson, la sclérose en plaques ou la maladie d'Alzheimer; à cet égard, une autre avancée attendue des nanotechnologies serait de transporter des médicaments au cerveau et d'en visualiser la délivrance⁶³. Toujours dans le domaine du traitement, il convient de signaler qu'il existe déjà sur le marché des pansements enduits de nanoparticules de sels d'argent qui agissent comme agent antibactérien sur les plaies ouvertes, utilisant ainsi une propriété de l'argent à l'échelle nanométrique⁶⁴. Des travaux sont en cours au Québec sur cette technologie, mais aussi sur la mise au point d'une technologie de libération à l'échelle nanométrique – entre autres pour les médicaments insolubles dans l'eau –, sur le développement de nanoparticules qui permettraient de libérer plus profondément les médicaments dans les poumons pour les personnes asthmatiques ou de polymères biodégradables qui seraient fabriqués par des bactéries et utilisés également pour l'administration de médicaments.

56. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *Implications of Nanotechnology for Environmental Health Research*, Lynn Goldman et Christine Coussens (dir.), Roundtable on Environmental Health Sciences, Research and Medicine, Board of Health Sciences Policy, Washington, D.C., The National Academies Press, 2005, p. 17 [en ligne] <http://www.nap.edu/catalog/11248.html>.

57. OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 18.

58. Voir «La nanotechnologie au service des écrans plats», *Club*, le magazine de l'Université Claude-Bernard – Lyon 1, n° 4, avril 2004, p. 8 [en ligne] http://www.univ-lyon1.fr/1126880808734/0/fiche___document/.

59. Voir, entre autres, Mauro FERRARI, «Cancer Nanotechnology: Opportunities and Challenges», *Nature Reviews: Cancer*, vol. 5, 7 mars 2005, p. 161-171 [en ligne] http://nano.cancer.gov/news_center/nanotech_news_2005-03-07b.asp.

60. OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 21.

61. *Ibid.*

62. Pour en savoir davantage, notamment sur la technologie PEBBLE (Probes Encapsulated by Biologically Localized Embedding), voir INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 18-22.

63. NANOTECH NEWS, «Nanoparticles Provide View of Drug Delivery into the Brain», 9 janvier 2006 [en ligne] http://nano.cancer.gov/news_center/nanotech_news_2006-01-09b.asp.

64. Voir, entre autres, INSTITUTE OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY TRUST FUND (Royaume-Uni), «Nanotechnology», Information Statement, février 2006 [en ligne] <http://www.ifst.org/uploadedfiles/cms/store/ATTACHMENTS/Nanotechnology.pdf> et THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 20.

Compenser les handicaps acquis ou congénitaux – Qu'il s'agisse de correction génétique (*in vitro* ou *in vivo*), de restauration ou de remplacement d'organes (en raison du vieillissement, de la maladie ou d'un accident), le recours aux nanobiotechnologies est porteur de promesses. Outre la thérapie génique* (pour contrer la mucoviscidose* ou les déficiences immunitaires⁶⁵), la fabrication de prothèses pourrait en bénéficier. Dans la mise au point de prothèses ou d'implants, les recherches visent à améliorer les façons de faire actuelles, notamment en créant « des matériaux biocompatibles, voire dotés de la capacité de s'auto-assembler [...] afin qu'ils se marient étroitement avec les tissus environnant [sic] sans être rejetés à terme⁶⁶ ». Par exemple, le dépôt d'une mince couche d'un nanomatériau semblable aux os à la surface des implants permettrait une meilleure compatibilité et une meilleure tenue mécanique avec l'os, ce qui augmenterait la durée de vie des implants jusqu'à 30 ans⁶⁷ – les prothèses actuelles pour les hanches et les genoux ont généralement une durée de vie d'une dizaine d'années, ce qui peut signifier plus d'une opération chez un même patient au cours de sa vie et donc des répercussions indésirables sur le plan humain ainsi que des coûts importants pour le système de santé. Les nanotechnologies pourraient aussi être utilisées pour restaurer des connexions nerveuses et, éventuellement, redonner l'usage de certains sens comme l'ouïe⁶⁸ ou la vue⁶⁹. Dans différents laboratoires universitaires au Québec, notamment en génie biomédical* et en ingénierie tissulaire* (ou génie tissulaire)⁷⁰, des travaux sur les nanomatériaux biodégradables sont en cours. La

fabrication de neuroprothèses* est également envisagée : il s'agirait d'établir une connexion entre un dispositif électronique et des cellules vivantes (des neurones) de façon à restaurer l'usage d'une fonction motrice, à tout le moins partiellement si ce n'est totalement⁷¹.

Dans le domaine de l'environnement

Les nanotechnologies pourraient servir à développer des applications proactives en matière de préservation de l'environnement, par exemple en participant au développement de l'énergie verte – comme l'énergie solaire – ou encore à des modes de production plus respectueux de l'environnement, c'est-à-dire qui exigeraient moins de matières premières, produiraient moins de matières résiduelles ou produiraient des biens plus durables⁷². Les nanomatériaux sont au nombre des moyens envisagés pour la conservation de l'énergie et la réduction des émissions de gaz carbonique (CO₂). Ils sont ainsi utilisés pour la mise au point des piles à combustible qui, parallèlement à l'hydrogène, sont considérées pour la production d'énergie⁷³ « propre » dans la recherche d'une solution de rechange aux moteurs à essence; ils servent à catalyser la conversion de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité, et entrent aussi dans la fabrication de réservoirs d'hydrogène à la fois plus résistants et plus légers⁷⁴. Au Québec, des travaux sont en cours pour mettre au point des membranes conductrices de protons plus performantes et moins coûteuses pour la fabrication de piles à combustible fonctionnant à basse température, concevoir des nanoparticules de nickel qui peuvent être utilisées dans la fabrication de piles

65. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 22.

66. OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 28; voir aussi les présentations à ce sujet qui ont été faites dans le cadre des audiences de l'organisme, p. 86 à 111 de la version Internet.

67. *Ibid.*, p. 25.

68. ISPUB.COM, *THE INTERNET JOURNAL OF NANOTECHNOLOGY*, « Nano-Bio-Technology Excellence in Health Care: A Review », RAJESH, GITANJALY, SURBHI, vol. 1, n° 2, 2005 [en ligne] <http://www.ispub.com/ostia/index.php?xmlFilePath=journals/ijnt/vol1n2/nanotech.xml>.

69. PHYSORG.COM, « Nanotechnology brings brain recovery in sight », MIT, 14 mars 2006 [en ligne] <http://www.physorg.com/news11755.html>.

70. Notamment, en ingénierie tissulaire, pour « créer des matériaux hybrides qui allient des matériaux nanostructurés (polymères organiques ou matériaux minéraux) et des cellules vivantes pour remplacer des tissus défaillants. Le grand défi consiste à réaliser des matériaux biocompatibles voire dotés de la capacité de s'auto assembler [...] afin qu'ils se marient étroitement avec les tissus environnant [sic] sans être rejetée [sic] à terme. » Voir OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 50.

71. *Ibid.*

72. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 14-16.

73. AMBASSADE DE FRANCE AU DANEMARK, *Les nanotechnologies au Danemark*, novembre 2005 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_095.htm.

74. Daniel LEBEAU, *op. cit.*, p. 15 et 16.

à combustible et produire des réservoirs fonctionnant avec les hydrures métalliques*. Un catalyseur pour le pot d'échappement des moteurs diesel est également en voie de développement. Conçu pour transformer en eau et en dioxyde de carbone le monoxyde de carbone et les composés organiques volatiles du carburant, un tel catalyseur vise à réduire les émissions polluantes des moteurs.

Les nanomatériaux peuvent aussi être mis à contribution dans le traitement des eaux et la restauration des sols. Des nanoperles sont d'ailleurs à l'essai dans l'Ouest canadien afin de restaurer des étangs saturés de sables bitumineux qui produisent du méthane en grande quantité, un gaz à effet de serre 22 fois plus puissant que le dioxyde de carbone⁷⁵. En matière de traitement des eaux, des membranes utilisées dans la fabrication des systèmes de filtration⁷⁶ auraient le potentiel nécessaire, grâce à leurs propriétés nanométriques, pour filtrer l'eau de façon à la recycler, à la réutiliser et à la désaliniser⁷⁷, mais aussi pour la décontaminer de ses produits toxiques⁷⁸; certains procédés devraient permettre de le faire à une fraction du coût actuel⁷⁹, ce qui signifierait, selon certains spécialistes, la fin des pénuries d'eau dans les régions arides du monde⁸⁰. La mise au point de capteurs électroniques et de biocapteurs, qui seront à la fois plus petits et moins coûteux et démontreront une sélectivité accrue⁸¹, pourrait éventuellement servir à vérifier la qualité de l'eau potable, à détecter et suivre à la trace des contaminants (agents chimiques, biologiques ou bactériologiques) présents dans l'air, dans le sol ou dans l'eau. De telles applications ont aussi

une portée dans le domaine de la défense et de la lutte au terrorisme (détection de gaz sarin ou de charbon [anthrax] par exemple). Au Québec, une entreprise propose des solutions de traitement des eaux utilisant la nanofiltration par des membranes dont la dimension des pores est nanométrique, ce qui permet de filtrer les contaminants chimiques et biologiques d'une taille supérieure aux pores de la membrane.

Dans le domaine des technologies de l'information

Les nouvelles technologies de miniaturisation ont pour but d'augmenter la vitesse des composants informatiques et leurs capacités de calcul, de traitement et de stockage des données; les économies d'énergie sont aussi recherchées. L'innovation pourrait également assurer une sécurité accrue au moyen de systèmes de contrôle et de vidéosurveillance plus discrets (miniaturisés) et plus performants. Des capteurs pourraient même servir d'interface entre le corps humain et l'ordinateur de façon à améliorer les performances de l'être humain⁸². Une étude rapporte que «l'utilisation des nanostructures dans la production de composants tels que l'optique ou la fibre optique permettrait des communications optiques sur de très longues distances sans amplification et permettrait également la fabrication de capteurs de liquide ou de gaz extrêmement sensibles⁸³».

Science-fiction ou application à long terme, à tout le moins une curiosité qu'il importe de signaler : la poussière électronique communicante* (aussi appelée «poussière intelligente», en anglais *smart dust*). Constituée d'un très

75. Maurice SMITH, «Beadwork. Small, reusable beads target residual bitumen in oilsand tailings», *New Technology Magazine*, septembre 2004.

76. Pour plus d'information, voir ENVIRONMENTAL SERVICES ASSOCIATION OF ALBERTA (Canada) – ESAA, *Nanotechnology in the Environment Industry: Opportunities and Trends*, Final Report and Bibliography for the Nano-Environmental Cross-Sector Initiative, 4 mars 2005, p. 40-42 et 61 [en ligne] [http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/\\$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf](http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf).

77. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (États-Unis), *External Review Draft. Nanotechnology White Paper*, Science Policy Council, Washington, 2 décembre 2005, p. 20 [en ligne] http://www.epa.gov/osa/pdfs/EPA_nanotechnology_white_paper_external_review_draft_12-02-2005.pdf

78. Peter A. SINGER, Fabio SALAMANCA-BUENTELLO et Abdallah S. DAAR, «Harnessing Nanotechnology to Improve Global Equity», *Issues in Science and Technology*, été 2005, p. 59 [en ligne] <http://www.issues.org/21.4/singer.html>.

79. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel*, Washington, D.C., 18 mai 2005, p. 37 [en ligne] <http://www.nano.gov/html/news/PCASTreport.htm>.

80. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 12.

81. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 19.

82. *Ibid.*, p. 19 et 54.

83. AMBASSADE DE FRANCE AU DANEMARK, *op. cit.*, p. 27.

grand nombre de nanopuces de silicium miniaturisées à l'extrême, cette poussière serait pulvérisée dans l'air ou incorporée dans des matériaux comme les peintures ou les textiles. Selon certains, « équipées de capteurs, de microprocesseurs, d'émetteurs et de sources d'énergie, elles [les poussières] formeront un réseau communicant capable de recevoir, traiter et transmettre des données. Les applications seront nombreuses tant dans le domaine de la défense (détection de substances chimiques et bactériologiques sur un champ de bataille, détection des mouvements de l'ennemi) que dans le domaine civil (surveillance de la qualité de l'air, traçabilité des produits alimentaires, surveillance médicale des patients, détection de la fatigue des matériaux)⁸⁴. » Des utilisations pourraient également en être faites en agriculture⁸⁵.

Dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation

Comme les biotechnologies, les nanotechnologies devraient permettre de réaliser des objectifs longtemps visés en agriculture : améliorer la production végétale, la transformation des aliments et leur sécurité sanitaire, ainsi que contrer les conséquences environnementales de la production, de l'entreposage et de la distribution des aliments⁸⁶. Le développement des nanotechnologies pourrait aussi contribuer à réduire la quantité de produits chimiques utilisés, grâce à la production de nano-systèmes de surveillance et de dosage qui permettraient de mesurer de façon très précise l'état de la production agricole et de mesurer de façon aussi précise la quantité de produits chimiques à introduire dans l'environnement⁸⁷. De tels systèmes nanométriques « intelligents* » font notamment appel à des biocapteurs dans le monitoring

de l'installation agricole, qu'il s'agisse de culture végétale ou d'élevage⁸⁸.

En matière d'alimentation, des recherches sont en cours pour concevoir des emballages dits intelligents⁸⁹ (ou réactifs) qui indiqueraient si le contenu n'est plus apte à être consommé ou si l'emballage a été perforé – l'ajout de feuilles d'argile nanométriques dans les polymères constituant l'emballage permet de rendre celui-ci plus imperméable à son environnement en diminuant les échanges gazeux entre le produit et l'air ambiant. Des nanoparticules enduites d'un vecteur spécifique (comme une protéine ou un fragment d'ADN) et d'un colorant pourraient changer de couleur et indiquer sur-le-champ la présence de bactéries ou de prions (responsables de l'encéphalite spongieuse bovine ou maladie de la vache folle) et, cela, sans qu'il faille attendre plusieurs heures ou plusieurs jours pour l'amplification en laboratoire de la présence des contaminants. Aujourd'hui, pour détecter la présence d'une bactérie, il faut prélever un échantillon, le placer dans un milieu nutritif à une température contrôlée et attendre ensuite environ 48 heures pour que la bactérie se développe en quantité suffisante pour pouvoir être observée au microscope.

Entre la fiction et la réalité

Si la frontière entre science et fiction est apparente pour les esprits scientifiques formés et informés, ce n'est pas toujours le cas pour le grand public qui peut puiser dans la littérature et le cinéma un succédané à une véritable culture scientifique. Les histoires d'extraterrestres qui envahissent la planète, les ordinateurs qui supplantent

84. MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France), *op. cit.*, p. 24; voir aussi OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 93.

85. NATIONAL PLANNING WORKSHOP (États-Unis), *Nanoscale Science and Engineering for Agriculture and Food Systems*, A Report submitted to Cooperative State Research, Education and Extension Service, The United States Department of Agriculture, National Planning Workshop, 18-19 novembre, 2002, Washington, D.C., septembre 2003 [en ligne] http://www.csrees.usda.gov/nea/technology/pdfs/nanoscale_10-30-03.pdf.

86. NATIONAL PLANNING WORKSHOP (États-Unis), *op. cit.*, p. 16; voir aussi SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *op. cit.*, p. 5; ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, *Down on the Farm. The Impact of Nano-scale Technologies on Food and Agriculture*, Canada, 23 novembre 2004 [en ligne] http://www.etcgroup.org/documents/NR_DownonFarm_final.pdf; Mihail C. ROCO et William Sims BAINBRIDGE (éd.), *Converging Technologies for Improving Human Performance...*, *op. cit.*, p. 6 [en ligne] http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf.

87. SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, *op. cit.*, p. 7.

88. NATIONAL PLANNING WORKSHOP (États-Unis), *op. cit.*, p. 29.

89. Voir, entre autres, « Emballage bioactif pour le secteur alimentaire. Les nanotechnologies pour de meilleurs emballages », *Les Affaires*, 3 mars 2006, p. 12; ETC GROUP, *Down on the Farm*. *op. cit.*, p. 41-43; ECONOMIC AND SOCIAL RESEARCH COUNCIL (Royaume-Uni), *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology*, Swindon, juillet 2003, p. 20 [en ligne] <http://www.shed.ac.uk/physics/people/rjones/PDFs/SECNanotechnology.pdf>.

et dominant l'être humain font partie des scénarios courants qui y sont abondamment véhiculés. Le domaine des nanotechnologies n'y échappe pas et a déjà inspiré des romans qui mettent l'accent sur des risques qui apparaissent, aux yeux des spécialistes, comme relevant du fantastique plus que de la réalité⁹⁰. Or, une mauvaise perception de ce que sont les nanotechnologies peut nuire à l'exercice d'un jugement éclairé, de la part des citoyens, dans les choix qui devront être faits au regard de leur développement et de leur implantation. La Commission a donc cru bon d'aborder le sujet relativement au double scénario de l'autoréplication et de l'écophagie globale* ainsi qu'à certaines exagérations dans les promesses qui sont faites et les espoirs qui sont véhiculés par l'émergence des nanotechnologies.

L'autoréplication de nanorobots et l'écophagie globale*

L'autoréplication est définie comme le « processus par lequel une nanomachine* ou un nanorobot produit des copies d'elle-même ou de lui-même, en se servant des matériaux présents dans son environnement⁹¹ ». C'est l'une des craintes les plus véhiculées à l'endroit des nanotechnologies. C'est aussi un scénario qui a été présenté dans le roman désormais célèbre de Michael Crichton, intitulé *La proie*⁹², dans lequel des scientifiques ont perdu le contrôle de la répllication de nanoparticules, qui s'échappent du laboratoire, s'emparent des humains et menacent la planète entière.

Or, selon les scientifiques, une éventualité de ce genre, qui exige un haut niveau de sophistication pour créer un tel organisme qui se propage et se reproduit, est virtuellement impossible, car elle viole de trop nombreuses

lois de la physique en matière de flux d'énergie et de thermodynamique⁹³.

La crainte de l'écophagie globale est intimement associée à celle de l'autoréplication des nanorobots et les deux sont difficilement dissociables. Le terme « écophagie globale » désigne, selon un « scénario catastrophique imaginé par certains spécialistes de la nanotechnologie, [le] processus par lequel des nanorobots s'autoreproduisant sans contrôle pourraient détruire tous les écosystèmes de la Terre, en transformant en une masse informe tous les matériaux qu'ils rencontrent⁹⁴ ». Un synonyme souvent utilisé est celui du problème de la gelée grise* – *grey goo* ou *gray goo* en anglais.

Dans son ouvrage de 1986 intitulé *Engins de création. L'avènement des nanotechnologies*⁹⁵, le visionnaire scientifique Eric Drexler présente un scénario qui a inspiré le roman de Crichton, et dont l'objectif essentiel était de servir d'avertissement face aux dangers potentiels de ce champ d'application en émergence⁹⁶. En 2000, Bill Joy, cofondateur de Sun Microsystems, appuyait en quelque sorte cette vision de Drexler et déclarait que les gens manifestent une attitude positive face aux innovations, qu'il présente comme un biais favorisant une familiarité instantanée et une acceptation inconditionnelle⁹⁷. À son avis, les gens sont tellement habitués de vivre dans un monde de perpétuelles découvertes scientifiques qu'ils arrivent difficilement à prendre conscience que les technologies du 21^e siècle – comme le génie génétique, les nanotechnologies et la robotique – posent des dangers bien différents de ceux associés aux technologies qui ont été déployées jusqu'alors : ces technologies créent des organismes qui peuvent se reproduire soit par accident, soit de façon délibérée.

90. Abby FRANK, « Nanotechnology Myths », Earth & Sky Radio Series, avril 2005 [en ligne] http://www.earthsky.org/shows/nanotechnology_articles_myths.php.

91. OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique*, op. cit.

92. Michael CRICHTON, *Prey*, New York, HarperCollins, 2002 ; en français : *La Proie*, Paris, Éd. Robert Laffont, 2003.

93. Voir, entre autres, THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), op. cit., annexe D, p. 109 : « Mechanical self-replicating nano-robots and 'Grey goo' » ; Abby FRANK, op. cit. ; R.E. SMALLEY « Of Chemistry, Love and Nanobots », *Scientific American*, septembre 2001, p. 76-77. Pour une discussion entre Drexler et Smalley sur le thème des « assembleurs moléculaires », voir *CHEMICAL AND ENGINEERING NEWS*, « Nanotechnology. Drexler and Smalley make the case for and against 'molecular assemblers' », Point-Counterpoint, vol. 81, n° 48, 1^{er} décembre 2003 [en ligne] http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/print/8148_counterpoint.html.

94. OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique*, op. cit.

95. K. Eric DREXLER, *Engines of Creation*, New York, Anchor Books, 1986 ; en français : *Les engins créateurs. L'avènement des nanotechnologies*, traduit de l'américain par Marc Macé, Paris, Vuibert, 2005.

96. Ce dont témoigne Christine Peterson, vice-présidente du Foresight Institute, dont les propos sont rapportés par Abby FRANK, op. cit.

97. Bill JOY, « Why the future doesn't need us », *Wired*, 8 avril 2000, p. 4 sur 19 de la version Internet : « Our Bias toward Instant Familiarity and Unquestioning Acceptance » [en ligne] <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.

Le roman de Crichton⁹⁸ sur le sujet, et les craintes exprimées par le prince Charles⁹⁹ en Grande-Bretagne après la lecture de ce livre, les scénarios catastrophiques d'écophagie globale ou de gelée grise ou verte* (la *green goo*) ont soulevé l'intérêt des médias et les craintes de la population en général pour cet aspect du développement éventuel des nanotechnologies. En décembre 2003, dans un échange de correspondance avec Drexler sur le thème de l'autoréplication et de l'écophagie qui pourrait en découler, le découvreur des fullerènes et Prix Nobel de chimie, Richard E. Smalley, précisait les raisons techniques et scientifiques qui démontrent l'impossibilité (selon les principes de la chimie et de la biologie) qu'une telle situation se produise. Depuis, Drexler¹⁰⁰ et le prince Charles se sont ralliés aux explications de Smalley et, dans l'état actuel des connaissances, il est généralement reconnu que les scénarios d'écophagie relèvent de la pure fiction¹⁰¹. Ils ne sont donc plus perçus comme une menace réelle.

Des promesses parfois irréalistes

Il existe une similitude entre les promesses qui accompagnent le développement des biotechnologies et celles qui marquent les progrès de la génétique, similitude qui se caractérise par une certaine exagération des retombées attendues (en anglais, le « *hype* »). Dans le premier cas, notamment en ce qui concerne les organismes génétiquement modifiés, il pourrait être possible de régler des problèmes comme celui de la faim dans le monde, de l'alimentation en eau potable des pays les plus défavorisés à cet égard, de produire des aliments comportant toutes les vitamines nécessaires, de l'avènement d'un mode de production agricole à la fois plus écologique et plus performant, etc. Dans le deuxième cas, il pourrait être possible d'éradiquer les gènes de la maladie ou d'intervenir directement sur eux pour contrer la maladie ou, encore, de pouvoir associer des gènes à différents types de comportements afin d'intervenir pour les modifier. Or, les promesses sont encore plus nombreuses lorsqu'il est question des nanotechnologies en raison de la diversité des domaines dans lesquels l'innovation nanotechnologique peut

prendre place, qu'il s'agisse de la santé, de l'énergie, de l'environnement, de l'agriculture et de bien d'autres encore, dans les pays développés comme dans les pays en développement.

Des promesses irréalistes pourraient nuire aux nanotechnologies plutôt que les aider à s'implanter sur le marché. En effet, les attentes des citoyens ne peuvent qu'être déçues si les résultats ne sont pas au rendez-vous, et une attitude de méfiance face à la façon dont est régi le développement des nouvelles technologies risque de s'installer. De plus, des attentes trop élevées quant aux possibilités des nanotechnologies pourraient faire en sorte de nuire au développement d'autres technologies, parfois plus prometteuses, mais peut-être moins fascinantes que ces nouvelles technologies. À cet égard, il convient donc de mesurer les avantages et les bénéfices par rapport à d'autres moyens techniques, qui pourraient parfois s'avérer un choix plus judicieux pour une foule de raisons, comme des coûts de développement et d'exploitation moindres pour des bénéfices tout aussi grands. En l'occurrence, **la Commission estime qu'il faudrait prendre garde à ne pas miser uniquement sur le recours aux nanotechnologies pour régler les problèmes, et ce, au détriment d'autres mesures en développement ou en exploration** ; dans le domaine de l'énergie, par exemple, il importe de poursuivre les efforts considérables qui sont consentis pour inciter la population à économiser les ressources non renouvelables et, en même temps, encourager la recherche portant sur de nouvelles sources d'énergie.

Des questions à soulever, des valeurs à privilégier

S'agissant des nanomatériaux, les bénéfices attendus des nanotechnologies comportent des solutions à plusieurs problèmes environnementaux et énergétiques, ce qui constitue un facteur important à l'appui de leur développement. En contrepartie, toutefois, selon les matériaux utilisés ou la nature d'une application, et particulièrement en ce qui a trait aux nanoparticules issues du processus de fabrication des nanomatériaux

98. *Op. cit.*

99. Essai publié le 11 juillet 2004 dans *The Independent on Sunday*.

100. Chris PHOENIX et Eric DREXLER, « Safe Exponential Manufacturing », *Nanotechnology*, vol. 15, n° 8, août 2004 [en ligne] <http://www.stacks.iop.org/Nano/15/869>.

101. Voir note infrapaginale 93.

(les nanoparticules de synthèse*), certaines inquiétudes doivent être formulées. Il importe de déterminer quels pourraient en être les effets sur l'environnement ou sur la santé des travailleurs, mais aussi sur celle des consommateurs, certains produits comme les crèmes solaires ou d'autres produits cosmétiques étant déjà proposés sur le marché.

En ce qui concerne la nanométrie, la technologie soulève peu de questions d'ordre éthique. Ce sont plutôt les limites du développement en la matière qui soulignent la nécessité d'établir un système de mesure et d'évaluation qui assure l'uniformité des processus. Ce sont de telles normes qui peuvent être garantes de façons de faire sécuritaires en matière de santé et d'environnement et qui permettent l'élaboration d'une réglementation adéquate.

C'est essentiellement dans sa composante relative aux technologies de l'information et de la communication et au développement de capteurs à haute performance (et, qui sait, à celui de la poussière électronique communicante) que la nanoélectronique suscite un questionnement. Des questions d'ordre éthique, qui ne sont pas nouvelles mais que les nanotechnologies risquent d'amplifier, sont soulevées quant au respect de la vie privée, puisque plusieurs données concernant, par exemple, l'état de santé des gens, leurs habitudes de consommation ou leurs allées et venues peuvent être enregistrées, et ce, à leur insu. Le risque d'utiliser la nanoélectronique pour augmenter artificiellement les performances physiques et mentales de l'être humain (au même titre que les stéroïdes ou le Ritalin, par exemple) doit aussi être pris en considération.

De toute évidence, les promesses que font miroiter les nanobiotechnologies dans le domaine de la santé encouragent bien des espoirs. Mais qu'en sera-t-il, par exemple, des produits médicamenteux issus des nanotechnologies – sans oublier les produits cosmétiques – et de la prise en considération des propriétés nouvelles qui se développent à l'échelle nanométrique? De quelle façon sera géré le contrôle de ces produits, qui ne sont pas nécessairement nouveaux, mais dont la composition intègre des ingrédients transformés? À quels usages se prêtera la capacité des produits nanotechnologiques à franchir la barrière hématoencéphalique qui protège le cerveau? En matière de diagnostic, des questions éthiques se posent relativement au dépistage précoce

d'un handicap ou d'une maladie, comme c'est aussi le cas en génétique, notamment quand la science médicale n'a aucune solution thérapeutique à offrir, ou au regard des coûts qui en découleront pour le système de santé : qui pourra profiter des progrès de la science et comment ces progrès seront-ils utilisés?

Ce ne sont là que quelques exemples de questions qui découlent de l'innovation nanotechnologique dans les quatre grands secteurs de développement des nanotechnologies. Mais il en est d'autres qui, de l'avis de la Commission, méritent qu'on y réfléchisse pendant qu'il en est encore temps, notamment en ce qui a trait aux applications qui peuvent résulter de la triple convergence de la biologie, de la nanoélectronique et des nanomatériaux dans la perspective de l'« amélioration » (*enhancement*) de l'être humain et de l'émergence de nouvelles pratiques eugéniques*. Quel sort nous attend si de telles applications s'avèrent disponibles? Quel type de société s'annonce? Qu'arrivera-t-il aux plus démunis, aux plus vulnérables, ou même à ceux qui refuseront de se prêter aux transformations offertes? Toutes ces interrogations posent aussi la question de l'instrumentalisation et de la transformation du corps humain.

Après ce bref tour d'horizon, **la Commission estime que le questionnement éthique soulevé par les nanotechnologies ne peut s'y limiter. Il doit être porteur d'une vision plus large, englobant d'autres technologies émergentes qui comportent le même genre de problèmes que ne pourra qu'amplifier ou exacerber l'avènement des nanotechnologies.** C'est pourquoi elle s'interroge aussi sur le développement économique et la gouvernance, l'organisation du travail, le développement de la recherche, les besoins des pays en développement.

Parmi les valeurs qui pourraient éventuellement être touchées par certaines applications des nanotechnologies ou par une utilisation dénaturée ou abusive de celles-ci, la Commission retient la dignité, la liberté, l'intégrité et le respect de la personne, la qualité de vie, la protection de la santé et de l'environnement, le respect de la vie privée, la justice et l'équité, la transparence, de même que la démocratie. Dans les pages qui suivent, le questionnement éthique à l'égard des nanotechnologies sera abordé en fonction de ces valeurs et relativement à la façon de gérer les conséquences qui peuvent être envisagées en matière de santé et d'environnement ; il portera aussi sur les interrogations à soulever en matière

de gouvernance et d'acceptabilité sociale, de même que sur les préoccupations philosophiques que peuvent susciter les nanotechnologies à certains égards.

Mais, auparavant, la Commission fait le point sur les balises normatives – lois et règlements – qui encadrent le développement et la mise en marché de produits issus de la nanotechnologie; elle considère également de quelle façon d'autres instruments d'ordre normatif, comme les guides de bonnes pratiques, pourraient jouer un rôle de garde-fou dans un domaine en émergence et s'interroge sur le recours à l'approche du cycle de vie et au principe de précaution pour réduire au minimum les risques relatifs aux nanotechnologies et aux produits qui en découlent.

Chapitre 2

Regard sur les modalités d'encadrement du secteur

Considérant l'intérêt que présentent les nanotechnologies en matière d'innovation technologique et l'ampleur du développement industriel qui pourrait en résulter dans un avenir plus ou moins rapproché, il est légitime de s'interroger sur le type d'encadrement qui a cours dans ce nouveau domaine. Après un bref aperçu des risques (avérés ou hypothétiques) associés aux nanotechnologies et des modalités d'évaluation et de gestion qui les concernent, la Commission passe en revue un certain nombre de lois, règlements et autres mécanismes d'encadrement qui visent à assurer la protection de l'environnement et de la santé des travailleurs du secteur, mais aussi la protection de la santé des consommateurs et de la population en général. Ce tour d'horizon a pour but de déterminer si ces instruments peuvent contrer les incidences indésirables que pourraient avoir les nouveaux produits issus des nanotechnologies sur la santé et sur l'environnement. S'interrogeant sur des approches qui peuvent orienter la prise de décision relative aux nanotechnologies, la Commission propose une réflexion sur le principe de précaution et sur la notion de « cycle de vie ».

Le risque et les nanotechnologies

La notion de risque est éminemment présente dans toute réflexion consacrée à l'émergence de technologies nouvelles¹⁰², davantage encore quand celle-ci porte sur les enjeux éthiques qui peuvent y être associés. Fondamentalement, le risque peut être défini comme un « événement éventuel, incertain, dont la réalisation ne dépend pas exclusivement de la volonté des parties et [qui peut] causer un dommage¹⁰³ ». Deux facteurs sont donc à considérer : la probabilité qu'un tel événement se produise et la nature ou l'importance des dommages qui pourraient en résulter¹⁰⁴.

S'agissant des nanotechnologies (ou d'autres technologies émergentes, la biotechnologie par exemple), ces deux facteurs – qui ne sont pas toujours présents – amènent à s'interroger sur les façons de composer avec l'incertitude scientifique liée à l'état des connaissances dans le domaine, mais aussi avec l'ignorance quant à ce qui pourrait se produire dans la foulée de l'implantation d'une nouvelle technologie. Dans ce dernier cas, d'ailleurs, il peut sembler inapproprié de parler de « risque » quand ce risque n'existe que sous la forme d'une hypothèse sur

les répercussions, les incidences ou les conséquences non voulues qui seraient attribuables aux nanotechnologies à travers le cycle de vie des produits nouveaux ou transformés qui en résultent. Sur le plan éthique, et sans adopter une approche catastrophiste, l'hypothèse qu'un événement porteur de conséquences possiblement néfastes puisse se produire ne peut être exclue. C'est dans cet esprit que la Commission utilise l'expression « risque avéré ou hypothétique » dans le cadre du présent avis. Elle veut ainsi adopter une vision « englobante » du risque qui permette de considérer aussi les hypothèses avancées ou les craintes énoncées, tout en sachant qu'elle donne alors un sens élargi au mot « risque ».

Il convient de mettre l'accent sur deux aspects des nanotechnologies pour souligner l'importance d'une meilleure compréhension et d'un meilleur encadrement du risque que ces technologies peuvent entraîner : d'une part, le rôle important que jouent les nanoparticules dans le développement de nouvelles applications nanotechnologiques – dans un contexte où les risques associés aux particules fines et ultrafines (non nanométriques) rejetées dans l'atmosphère sont relativement bien connus en hygiène industrielle, en

102. Sur le sujet, voir, entre autres, ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents au xxi^e siècle. Vers un programme d'action*, Paris, 2003.

103. OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique*, op. cit.

104. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents au xxi^e siècle...*, op. cit., p. 32.

santé et en environnement – et, d'autre part, les propriétés nouvelles que peuvent acquérir les matériaux à l'échelle nanométrique (toxicité, conductivité, réactivité, par exemple).

S'appuyant sur cette mise en contexte de la notion de risque dans le domaine des nanotechnologies, la Commission s'efforce de saisir quels sont les risques (avérés ou hypothétiques) que posent les nanotechnologies et de déterminer si les modalités actuelles d'évaluation et de gestion des risques peuvent prendre en compte la spécificité des produits issus des nanotechnologies.

La nature des risques à considérer

Au même titre que toute autre particule naturelle ou industrielle qui présente des risques de toxicité pour les organismes vivants, les nanoparticules de synthèse (qui sont créées volontairement) sont elles aussi porteuses de risques – associés à leur manipulation ou à des rejets (volontaires ou accidentels) dans l'air, le sol et l'eau – qui doivent être pris en considération afin de protéger les travailleurs du domaine, la population et la biodiversité dans son ensemble :

- risques liés à la fabrication, à la manutention, au transport, à l'entreposage et à l'élimination de produits potentiellement toxiques ou dangereux ;
- risques d'absorption par l'organisme (inhalation, ingestion, voie cutanée) de poudres ou de produits toxiques, qu'il s'agisse des travailleurs de laboratoire et de l'industrie ou d'une population qui aurait été en contact avec ces produits à la suite de rejets dans l'air, dans l'eau ou dans le sol ;
- risques de contamination de l'environnement, de la faune et de la flore, par des rejets dans l'air, dans l'eau ou dans le sol ;
- risques liés à la réactivité de certaines substances (environnement, santé).

De tels risques relatifs à des produits qui ne sont pas issus des nanotechnologies sont actuellement couverts par un certain nombre de lois et de règlements en vigueur ; la Commission les présente brièvement un peu plus loin dans ce chapitre.

Mais il peut aussi exister des risques qui concernent plus spécifiquement les produits issus des nanotechnologies en raison de leurs caractéristiques particulières et pour lesquels la recherche n'est pas toujours concluante, par exemple¹⁰⁵ :

- la tendance à l'agglutination des particules nanométriques de synthèse et ses effets potentiels sur l'environnement et dans les organismes vivants ;
- l'importance de la surface spécifique de la matière nanométrique par rapport à sa masse, ce qui contribue à modifier ou à amplifier les propriétés de la matière originale ;
- la réactivité que développent certaines particules nanométriques, notamment les nanopoudres métalliques, ce qui peut engendrer des risques d'explosion, d'inflammabilité ou de toxicité ;
- la capacité de la matière nanométrique à traverser les barrières des systèmes de protection de l'organisme humain et animal (barrières cutanée, pulmonaire, intestinale, placentaire, hématoencéphalique).

Comme le soulignent bon nombre des documents consultés, dans toute approche relative au risque posé par les nanoparticules il importe également de distinguer les particules libres (y compris les particules agglomérées) des particules qui entrent dans la composition d'un objet non nanométrique (par exemple un composant nanométrique d'un appareil utilisé en médecine à des fins endoscopiques) et qui deviennent ainsi des particules fixes. Pour le moment, ces dernières structures seraient considérées comme étant sans risques pour la santé et pour l'environnement¹⁰⁶. En revanche, comme l'observe l'IRSST, « les nanoparticules libres dans l'air préoccupent quant à leur potentiel de causer des problèmes de santé et de sécurité en milieu de travail ou des problèmes d'accumulation dans l'environnement ou d'enrichissement à travers la chaîne alimentaire, se traduisant par des risques à long terme pour la santé des populations. Quoique les connaissances actuelles sur la toxicité des nanoparticules et du niveau potentiel d'exposition des travailleurs soient très limitées, les résultats préliminaires semblent démontrer une importante activité biologique et des effets délétères

105. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.* ; SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *op. cit.*

106. SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *op. cit.*, p. 58.

indésirables dans la majorité des principales études réalisées. La prolifération des nouvelles nanoparticules et les modifications de surface apportées, qui auront un impact majeur sur les propriétés de surface et potentiellement sur leur réactivité biologique et leur toxicité, rendra presque impossible, à court terme, l'établissement d'une connaissance adéquate au niveau du risque associé à chacune de ces nouvelles particules¹⁰⁷. »

Les modalités d'évaluation et de gestion du risque : quelques constats et interrogations

Bien qu'il y ait encore très peu de données environnementales et épidémiologiques sur lesquelles appuyer un processus d'évaluation et de gestion du risque relativement aux produits issus des nanotechnologies, il a été clairement démontré, selon l'IRSST, que le degré de toxicité des nanoparticules est lié à leur surface spécifique et aux propriétés nouvelles qui en découlent, et non à leur masse¹⁰⁸. Or, les études réalisées jusqu'à présent ont porté plus sur la masse que sur la surface ou la dimension des particules étudiées; ce qui, de l'avis de certaines autorités, peut fortement amener à sous-estimer le potentiel de risque des nanoparticules¹⁰⁹. À cet égard, il importe également de considérer que la structure de la matière et le rapport entre sa masse et sa surface spécifique peuvent varier selon la dimension nanométrique obtenue et la matière elle-même; c'est donc dire que les propriétés d'une particule d'or de 90 nanomètres pourront être différentes de celles d'une même particule de 20 nanomètres et que de telles différences pourront également être notées pour d'autres matériaux. Cela n'est pas sans causer un problème additionnel en matière de caractérisation des produits et semble indiquer qu'une approche au cas par cas pourrait s'avérer nécessaire.

Ces changements de propriété soulèvent la question de l'approbation nécessaire pour la mise en marché de nouveaux produits. Les produits issus des nanotechnologies ou transformés en raison du recours à cette nouvelle technologie sont-ils considérés comme de nouveaux produits? Alors que des produits connus pour présenter des risques en matière de santé ou d'environnement doivent obligatoirement être soumis à des agences de contrôle (comme Santé Canada ou Environnement Canada), qu'en est-il pour des produits dont les risques sont inconnus ou incertains? Pour approuver la mise en marché d'un produit et donner à la population des garanties quant à son innocuité pour la santé et à sa sécurité pour l'environnement, ces agences évaluent le risque selon des modalités relatives à la nature et à la finalité du produit et non pas en fonction de son mode de fabrication ou d'une éventuelle transformation de ses composants. Ces procédés permettent-ils de considérer la spécificité des produits issus des nanotechnologies (au même titre que ceux issus de la transgénèse, comme l'a déjà signalé la Commission dans un avis consacré aux organismes génétiquement modifiés¹¹⁰)? Pourtant, de tels produits sont déjà sur le marché – la base de données du Woodrow Wilson Center en recensait plus de 200 à l'hiver 2006¹¹¹; et le mouvement ne peut que s'amplifier avec les progrès de la recherche.

S'appuyant sur un exemple tiré du domaine des cosmétiques, la Commission s'interroge sur le changement de propriété du dioxyde de titane (TiO₂); déjà utilisé dans les crèmes solaires, ce produit chimique devient transparent à l'échelle nanométrique et pénètre plus facilement la peau. La présence de ce produit dans les crèmes solaires n'est pas nouvelle, mais l'utilisation de nanoparticules constitue une nouveauté; les exigences actuelles des agences de contrôle à l'égard des nouveaux

107. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les nanoparticules. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité du travail*, Claude OSTIGUY et collaborateurs, Rapport R-455, Études et recherches, Gouvernement du Québec, mars 2006, p. 65 [en ligne] http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100189.html.

108. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé reliés aux nanoparticules*, op. cit., p. 40.

109. *Ibid.*, p. 47.

110. COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Pour une gestion éthique des OGM*, Gouvernement du Québec, 2003; voir, entre autres, p. 31 à 42 [en ligne] http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/CEST_AvisOGMfinal.pdf.

111. WOODROW WILSON CENTER FOR SCHOLARS, « A Nanotechnology Consumer Products Inventory » [en ligne] <http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>. En raison de la méthode de collecte utilisée – recherche sur Internet de sites annonçant des produits avec des composants nanotechnologiques – cette liste est forcément incomplète et les produits en circulation sont vraisemblablement plus nombreux.

produits ou des produits transformés permettent-elles de prendre en compte des changements de cette nature dans la préparation d'un produit de consommation déjà offert sur le marché sans composant nanométrique? Considérant que le passage de la matière à la taille nanométrique peut créer des changements à la fois sur le plan de l'exposition (y compris le devenir, la persistance, la bioaccumulation du produit dans l'environnement ou dans des organismes vivants) et sur celui de la nature ou de l'ampleur des effets possiblement néfastes¹¹², à quel point les modalités d'évaluation actuelle sont-elles adéquates en ce qui a trait aux produits issus des nanotechnologies et à leurs répercussions sur la santé et sur l'environnement?

Finalement, la Commission retient que les effets des nanoparticules sur la santé et sur l'environnement restent encore peu étudiés en laboratoire, notamment sur les humains, et que les quelques résultats de recherche obtenus sont parfois contradictoires et difficiles à reproduire. Selon certains, l'équipement actuel pour mesurer l'exposition aux nanoparticules libres serait même inadéquat, tout comme les méthodes d'évaluation en place pour déterminer le devenir environnemental des nanoparticules¹¹³. Cela dit, parmi les enjeux qui sont considérés comme cruciaux en matière d'évaluation des risques associés aux nanoparticules de synthèse, la Commission estime important de rappeler ceux qui ont été proposés à la suite d'une consultation menée par d'importants organismes américains¹¹⁴:

- l'évaluation du degré d'exposition;
- la toxicité;
- la capacité d'extrapoler la toxicité des nanoparticules à partir des bases de données sur la toxicité des particules et des fibres non nanométriques;
- le devenir environnemental et biologique des nanoparticules, ainsi que leur transport, leur persistance et leur transformation;

- les nanoparticules au regard du recyclage et du développement durable.

Pour la Commission, il est manifeste que l'émergence des nanotechnologies et la mise en marché de produits qui en sont issus ouvrent la voie à de nouvelles modalités d'évaluation du risque en matière de santé et d'environnement.

L'encadrement actuel

Au Canada, comme au Québec, il n'existe pas de lois ou de règlements qui concernent directement les nanotechnologies, à quelque étape que ce soit à l'intérieur du cycle de vie des produits nanotechnologiques ou intégrant des composants nanométriques. Et c'est généralement le cas partout ailleurs, la raison étant principalement que les nanotechnologies servent plus à modifier des produits existants pour leur donner une valeur ajoutée qu'à créer de toutes pièces de nouveaux produits.

L'absence de normes propres aux nanotechnologies ne signifie cependant pas qu'il n'y ait aucun encadrement auquel le secteur soit tenu de se soumettre. Il existe en effet un certain nombre de lois et de règlements qui doivent être respectés – selon la juridiction applicable (fédérale ou provinciale) –, de la fabrication d'un produit jusqu'à son élimination; en ce qui a trait à la protection de la santé, de la sécurité au travail et de l'environnement, ces textes législatifs s'appliquent aussi aux nanomatériaux, le cas échéant, même si ceux-ci ne sont pas encore expressément mentionnés. Toutefois, comme la Commission l'a signalé plus haut, certaines caractéristiques ou propriétés des nanotechnologies ou des objets nanométriques ne sont pas nécessairement prises en considération dans les lois existantes et une adaptation s'impose.

112. SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *op. cit.*, p. 54.

113. *Ibid.*, p. 4.

114. Résultats d'un atelier de travail organisé par la National Science Foundation (NSF) et la US Environmental Protection Agency (EPA), signalés dans Kevin L. DREHER, « Toxicological Highlight. Health and Environmental Impact of Nanotechnology: Toxicological Assessment of Manufactured Nanoparticles », *Toxicological Sciences*, vol. 77, n° 1, 2004 [en ligne] <http://171.66.120.171/cgi/content/full/77/1/3>. Voir aussi Wolfgang LUTHER (dir.), *Industrial Application of Nanomaterials – Chances and Risks*, Technological Analysis, with the support of the European Commission, août 2004 [en ligne] <http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/zukunft/sub/10803/index.php>.

Lois et règlements canadiens

Sans prétendre à l'exhaustivité, parmi les lois et les règlements qui doivent être respectés en matière de protection de l'environnement et de protection de la santé (de façon générale et sur le plan de l'hygiène industrielle) et selon la juridiction applicable, la Commission a retenu les textes suivants :

- **Le Code canadien du travail** (L.R., 1985, ch. L-2)¹¹⁵, dont la partie II est consacrée à la santé et à la sécurité au travail.
- **Le Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail** (DORS/86-304)¹¹⁶, notamment les parties X (substances dangereuses), XI (espaces clos), XII (matériel, équipement, dispositifs, vêtements de sécurité) et XIV (manutention des matériaux), qui sont particulièrement pertinentes pour tenir compte des nanomatériaux.
- **La Loi canadienne sur la protection de l'environnement** (1999, ch. 33)¹¹⁷, dont les parties 4 (prévention de la pollution), 5 (substances toxiques), 6 (substances biotechnologiques animées) et 7 (contrôle de la pollution et gestion des déchets) devraient s'appliquer à certains produits nanotechnologiques.
- **La Loi sur les produits dangereux** (L.R., 1985, ch. H-3)¹¹⁸ et **le Règlement sur les produits contrôlés** (DORS/88-66)¹¹⁹, qui présentent un intérêt pour les nanotechnologies, plus particulièrement au regard de la distinction qui y est faite entre produits interdits, produits limités et produits contrôlés. Ce sont ces derniers qui sont particulièrement pertinents pour les nanotechnologies, car ils comprennent des produits, matières ou substances qui entrent dans les catégories suivantes : gaz comprimés, matières inflammables et combustibles, matières comburantes, matières toxiques et infectieuses, matières corrosives, matières dangereusement réactives (Annexe II),

auxquelles il convient d'ajouter les peintures, émaux et autres revêtements liquides (Annexe I, partie II, alinéa 31) parce que ceux-ci peuvent intégrer des composants nanométriques. Santé Canada est à la fois responsable de la mise en application de la loi et du règlement ainsi que de la gestion du Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT – voir l'encadré), auquel renvoient plusieurs lois et règlements fédéraux, provinciaux et territoriaux.

Dans le même ordre d'idées, il convient aussi de signaler **la Loi sur le contrôle des renseignements relatifs aux matières dangereuses** (L.R., 1985, ch. 24, 3^e suppl.)¹²⁰, **le règlement du même nom** (DORS/88-456)¹²¹, **la Loi de 1992 sur le transport des marchandises dangereuses** (1992, ch. 34)¹²² et **le règlement du même nom** (DORS/2001-286)¹²³.

À propos du SIMDUT

« Le Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT) constitue la norme canadienne en matière de communication des renseignements sur les dangers. Les éléments essentiels du SIMDUT se composent d'étiquettes de précaution sur les contenants de "produits contrôlés", de fiches signalétiques et de programmes de formation pour les travailleurs.

Le SIMDUT est mis en œuvre par le biais des lois fédérales, provinciales et territoriales. Les exigences s'appliquant aux fournisseurs concernent les fiches signalétiques et les étiquettes énoncées dans la *Loi sur les produits dangereux* et le *Règlement sur les produits contrôlés*. Le Ministère de la Santé du Gouvernement du Canada, couramment appelé Santé Canada, est responsable de la mise en application de la *Loi sur les produits dangereux* et de ses règlements.

Le *Règlement sur les produits contrôlés* établit une norme nationale pour la classification des matières dangereuses utilisées au travail. En plus d'établir les critères pour les dangers biologiques, chimiques et aigus, les règlements

115. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/L-2/>.

116. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/L-2/DORS-86-304/>.

117. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/C-15.31/texte.html>.

118. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-3/texte.html>.

119. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-3/DORS-88-66/>.

120. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-2.7/texte.html>.

121. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-2.7/DORS-88-456/texte.html>.

122. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/T-19.01/index.html>.

123. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/T-19.01/DORS-2001-286/180329.html>.

spécifient les critères pour les dangers chroniques pour la santé incluant la mutagénicité*, la carcinogénicité*, l'embryotoxicité* et la toxicité pour la reproduction, et la sensibilisation des voies respiratoires et de la peau.

Chacun des 13 organismes fédéral, provinciaux et territoriaux responsables de la santé et de la sécurité au travail a établi, dans son secteur de compétence, des exigences SIMDUT applicables aux employeurs. Ces règlements exigent que les employeurs étiquettent adéquatement les produits contrôlés utilisés, entreposés, manutentionnés ou éliminés des lieux de travail; qu'ils mettent à la disposition des travailleurs des fiches signalétiques; qu'ils offrent la formation pertinente dans le but d'assurer un entreposage, une manutention, et une utilisation sécuritaires des produits contrôlés sur les lieux de travail.

Le SIMDUT concilie le droit des travailleurs de savoir et le droit de l'industrie de protéger les renseignements commerciaux confidentiels. Le système prévoit des mécanismes de décision à l'égard des demandes de dérogation, c'est-à-dire le droit de ne pas divulguer certains renseignements commerciaux confidentiels de même que des mécanismes pour en appeler de ces décisions.»

SANTÉ CANADA¹²⁴

- **La Loi sur les aliments et drogues (L.R., 1985, ch. F-27)¹²⁵ et le règlement du même nom (C.R.C., ch. 870)¹²⁶**; régis par Santé Canada, ces textes législatifs concernent les aliments, les drogues (médicaments), les cosmétiques et les instruments thérapeutiques. Dans l'état actuel du développement des nanotechnologies, leur contenu présente un intérêt particulier pour les applications dans le secteur de la santé et des cosmétiques, mais un peu moins dans le domaine de l'alimentation, pour l'instant, sauf pour les questions d'emballage. Le règlement précise que ses dispositions «lorsqu'il y a lieu [...] établissent les normes de composition, de concentration, d'activité, de pureté, de qualité ou autre propriété de la substance alimentaire ou de la drogue, auxquelles elles se rapportent» (art. 01.002). Il n'y a, pour le moment, aucune référence à l'utilisation de produits

nanométriques dans la composition ou l'enrobage des médicaments nouveaux ou transformés, pas plus que dans le processus d'approbation qui conduit à leur mise en marché¹²⁷, et il n'y en a pas plus, d'ailleurs, en ce qui concerne l'approbation d'autres applications en matière de santé.

Lois et règlements québécois

En complément aux textes législatifs canadiens ou distincts de ces textes, les lois et règlements québécois ci-dessous sont du nombre de ceux qui peuvent avoir une pertinence dans le domaine des nanotechnologies et nécessiter une adaptation en conséquence:

- **La Loi sur la santé et la sécurité du travail (L.R.Q., c. S-2.1)¹²⁸ et le règlement du même nom (R.Q., c. S-2.1, r.19.01)¹²⁹**; ces textes ont pour but «l'élimination à la source même des dangers pour la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs». Les dispositions les plus pertinentes de la loi, en matière d'adaptation aux nanotechnologies, sont contenues au chapitre III sur les droits et obligations des travailleurs, de l'employeur et du fournisseur ainsi qu'au chapitre VIII sur la santé au travail. Mais c'est le règlement d'application de cette loi qui est particulièrement pertinent et qui demanderait à être adapté aux nanotechnologies. En effet, ce règlement a pour objet: «[d'] établir des normes concernant notamment la qualité de l'air, la température, l'humidité, les contraintes thermiques, l'éclairage, le bruit et d'autres contaminants, les installations sanitaires, la ventilation, l'hygiène, la salubrité et la propreté dans les établissements, l'aménagement des lieux, l'entreposage et la manutention des matières dangereuses, la sécurité des machines et des outils, certains travaux à risque particulier, les équipements de protection individuels et le transport des travailleurs en vue d'assurer la qualité du milieu de travail, de protéger la santé des travailleurs et d'assurer leur sécurité et leur intégrité physique».

124. Tiré du site Internet de Santé Canada: http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/occup-travail/whmis-simdut/application/about-a_propos_f.html.

125. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/>.

126. Voir <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/C.R.C.-ch.870/texte.html>

127. Pour plus de détails sur l'ensemble du processus, le lecteur est invité à consulter l'avis de la Commission sur les OGM, *Pour une gestion éthique des OGM*, op. cit., p. 27-29 et 35-41 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/CESTAvisOGMfinal.pdf>.

128. Voir <http://www.iiijcan.org/qc/legis/loi/s-2.1/20060412/tout.html>.

129. Voir <http://www.iiijcan.org/qc/legis/regl/s-2.1r.19.01/20060412/tout.html>.

- **Le Règlement sur l'information concernant les produits contrôlés au Québec (R.Q., c. S-2.1, r.10.1)**¹³⁰, qui apporte, pour le contexte québécois, des précisions aux lois et règlements canadiens de même nature.
- **La Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2)**¹³¹, qui précise et complète au besoin la loi canadienne sur le sujet et formule les exigences relatives à la protection de l'environnement pour le Québec et certaines parties de son territoire. Les lois et règlements relatifs aux rejets industriels au Québec y sont assujettis. La section VII sur la gestion des matières résiduelles devrait tenir compte du développement des nanotechnologies. Parmi les quelque soixante règlements d'application de la loi, les trois règlements ci-dessous sont probablement les plus pertinents.
- **Le Règlement sur les matières dangereuses (R.Q., c. Q-2, r.15.2)**¹³², qui complète et précise le Règlement sur les produits contrôlés, notamment le chapitre I qui définit les matières dangereuses et leurs propriétés – matières comburantes, corrosives, explosives, gazeuses, inflammables, lixiviables*, radioactives et toxiques –, dont certaines peuvent s'appliquer à des produits nanotechnologiques.
- **Le Règlement sur la qualité de l'atmosphère (R.Q., c. Q-2, r.20)**¹³³, dont l'objet est d'« [...] établir des normes d'air ambiant et des normes d'émission des matières particulaires, des vapeurs et des gaz, des normes d'opacité des émissions ainsi que des mesures de contrôle pour prévenir, éliminer ou réduire le dégagement de contaminants provenant des sources fixes » (section II, article 2).
- **Le Règlement sur la qualité de l'eau potable (R.Q., c. Q-2, r.18.1.1)**¹³⁴, qui précise que « l'eau destinée à la consommation humaine doit, lorsqu'elle est mise à disposition de l'utilisateur, satisfaire aux normes de qualité de l'eau potable » inscrites dans des annexes

concernant les concentrations maximales des substances inorganiques, organiques ou radioactives qui peuvent être présentes dans l'eau.

Il convient de souligner qu'avec l'adoption, en avril 2006, de la nouvelle *Loi sur le développement durable*¹³⁵, les lois et règlements mentionnés plus haut s'inscrivent également dans une perspective de gouvernance fondée sur le développement durable. De nombreux principes ont été retenus aux fins de la mise en œuvre de cette loi, dont les suivants qui sont appelés à jouer un rôle important au regard des nanotechnologies, notamment ceux relatifs à la prévention, à la précaution et au pollueur-payeur. À l'article 11, la loi prévoit également que la stratégie de développement durable qui sera ultérieurement adoptée par le gouvernement devra « mettre en application des approches liées [aux principes retenus], notamment quant au cycle de vie des produits et des services ».

Instruments internationaux

Certains instruments internationaux comportent des exigences relatives au transport d'un pays à un autre de matières jugées dangereuses et pouvant présenter un risque pour la santé ou pour l'environnement. De tels instruments amènent les gouvernements nationaux à adapter leurs propres instruments dans un contexte d'échanges commerciaux. Tout comme les lois et les règlements actuellement en vigueur au Canada et au Québec, ces instruments devront toutefois être adaptés pour tenir compte des produits nanotechnologiques qui peuvent être porteurs de risques, avérés ou hypothétiques.

- **Règlement type de l'ONU. Recommandations relatives au transport des marchandises dangereuses. Quatorzième édition révisée, 2005**¹³⁶. Les recommandations de l'organisme s'adressent aux gouvernements et aux organisations internationales ayant à s'occuper de la réglementation du transport des marchandises dangereuses.

130. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/s-2.1r.10.1/20060412/tout.html>.

131. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/loi/q-2/20060412/tout.html>.

132. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.15.2/20060412/tout.html>.

133. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.20/20060412/tout.html>.

134. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.4.1/20060412/tout.html>.

135. Voir <http://www.ijcan.org/qc/legis/loi/d-8.1.1/20060525/tout.html>.

136. Voir http://www.unec.org/trans/danger/publi/unrec/rev14/14files_f.html.

- **Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses. Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)**¹³⁷. Ce texte énonce les principes généraux qui sous-tendent les instructions et contient notamment la liste des matières jugées dangereuses et les exigences requises pour leur transport, dans une perspective d'harmonisation internationale des façons de faire.
- **Réglementation pour le transport des marchandises dangereuses 2006 – 47^e édition**¹³⁸. Soumis aux exigences de l'OACI, ce règlement comporte aussi ses propres exigences.
- **International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code**¹³⁹. En complément au contenu de la *Convention internationale du 1^{er} novembre 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS – 1974)*¹⁴⁰, le Code spécifie les exigences relatives au transport des matières dangereuses en mer.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Dans un contexte où le développement des nanotechnologies et la mise en marché de produits nanométriques ou à composants nanométriques sont déjà bien amorcés et ne pourront que s'amplifier au cours des années qui viennent, la Commission estime que la vigilance s'impose et qu'il faudra suivre attentivement l'évolution de ces technologies nouvelles afin d'adapter la réglementation actuelle aux réalités du secteur.

En soutien à l'industrie

Les lois et règlements occupent certes une part importante de l'encadrement nécessaire à l'innovation technologique, mais ces textes législatifs accusent

presque toujours un certain retard par rapport au développement des technologies et ne peuvent tout régler. Afin de répondre aux besoins de l'entreprise, d'autres mécanismes doivent donc être utilisés pour assurer une forme d'autorégulation dans un secteur d'activité en émergence et combler le vide qui peut être laissé par l'absence de réglementation; les guides de bonnes pratiques en font partie.

Un tel guide est actuellement en préparation pour les besoins de l'industrie québécoise des nanotechnologies (y compris les laboratoires) et devrait être publié avant la fin de 2006. Élaboré sous la responsabilité de l'Institut de recherche Robert-Sauvé¹⁴¹, avec la collaboration de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et NanoQuébec, le guide permettra d'informer le milieu professionnel en nanotechnologies sur l'environnement de travail propre à ce secteur d'activité et sur les meilleures façons de faire pour assurer la santé et la sécurité de toutes les personnes qui y sont liées (y compris les étudiants et les chercheurs), tout en favorisant la protection de l'environnement

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

La Commission encourage l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail à poursuivre, en collaboration avec ses partenaires, la préparation de son guide de bonnes pratiques afin de le publier le plus tôt possible. Elle invite également les divers ministères que concerne le développement des nanotechnologies à inciter la communauté des chercheurs et des industriels de ce secteur d'activité à respecter les pratiques préconisées dans ce guide, mais aussi à contribuer à la promotion et à l'enrichissement de celui-ci. Dans la perspective d'éviter toute répercussion non désirable des nanotechnologies sur la santé des travailleurs et sur l'environnement, la Commission estime qu'un tel guide s'impose dans l'état actuel du développement des nanotechnologies.

137. Ce document n'est pas disponible sur Internet; le site de l'organisme contient uniquement les propositions d'amendement à certaines parties du texte. Voir http://www.icao.int/cgi/goto_m_f.pl?icao/fr/search_icao_f.html.

138. Ce document n'est pas disponible sur Internet. Voir cependant la description du produit offert à l'adresse suivante : https://www.iataonline.com/Store/Products/Product+Detail.htm?cs_id=9066%2D47&cs_catalog=Publications.

139. Revu tous les deux ans. Les derniers amendements sont entrés en vigueur en janvier 2004. Le document n'est pas disponible sur Internet. Voir cependant la description du produit offert à l'adresse suivante : <http://www.imo.org/home.asp>.

140. Voir : http://www.imo.org/Conventions/contents.asp?topic_id=257&doc_id=647#description.

141. L'Institut a d'ailleurs publié deux rapports, déjà cités, sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité du travail. Il s'agit des rapports R-451 et R-455.

Des approches responsables pour composer avec le risque

Il arrive rarement, dans une société, qu'il soit possible de s'interroger tôt sur l'importance d'encadrer le développement et l'émergence d'une nouvelle technologie. Si cela n'a certes pas été le cas pour la génomique, la transgénése ou les technologies de l'information et de la communication, le contexte pourrait s'y prêter pour les nanotechnologies. Il importe donc de se demander s'il faut encadrer cette technologie et dans quelle mesure. Pour certains, il n'y a pas lieu de légiférer sur les nanotechnologies¹⁴²; d'autres croient au contraire que c'est pertinent¹⁴³, alors que pour d'autres encore l'imposition d'un moratoire sur les nanotechnologies apparaît comme la seule solution possible¹⁴⁴. Dans l'état actuel des choses, la Commission s'est interrogée sur deux approches à considérer relativement à l'encadrement des nanotechnologies : le recours au principe de précaution et l'approche « cycle de vie ».

Le principe de précaution

Considérant l'incertitude et l'ignorance quant aux répercussions possibles des nanotechnologies sur la santé et sur l'environnement, bon nombre de textes consacrés aux nanotechnologies font référence au principe de précaution, généralement pour souligner l'absence d'un véritable consensus sur sa définition et la difficulté de sa mise en application sans nuire aux progrès de la science. Il n'y a pas, non plus, de position commune sur le rôle qu'il peut jouer dans le processus d'analyse du risque¹⁴⁵.

Dans son avis de 2003 sur les OGM¹⁴⁶, la Commission préconisait le recours à une « approche » de la précaution en la matière, considérant qu'une telle orientation permettait plus de souplesse que le recours à un principe formel, comme celui de la précaution ; cette décision s'appuyait également sur la confusion qui règne autour du sens exact à donner à ce principe et sur la difficulté qui en découle pour une utilisation conforme à l'esprit du principe. Dans le cadre du présent avis, la Commission estime toutefois pertinent de revenir sur le sujet et de considérer la question du principe de précaution au regard des nanotechnologies, en s'appuyant, entre autres, sur la tenue d'un séminaire qu'elle a organisé sur ce thème en novembre 2005. Elle le fait dans un double objectif : déterminer si un appel au principe de précaution plutôt qu'à une « approche » de précaution se justifie dans le contexte des nanotechnologies et combattre, dans une mesure même modeste, le recours de plus en plus courant à ce principe pour justifier l'absence de décision. À noter que, pour l'UNESCO, « le principe se réfère à la base philosophique de la précaution et l'approche à son application pratique¹⁴⁷ ».

L'UNESCO propose la définition suivante du principe de précaution : « Lorsque des activités humaines risquent d'aboutir à un danger moralement inacceptable, qui est scientifiquement plausible mais incertain, des mesures doivent être prises pour éviter ou diminuer ce danger¹⁴⁸. » Comme la plupart des autres définitions sur le sujet, elle s'inspire de celle qui a été adoptée lors du Sommet de la Terre tenu à Rio en juin 1992 : « Principe 15 : Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les États selon leurs capacités.

142. C'est l'avis émis par THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, dont les auteurs recommandent néanmoins un suivi vigilant de l'évolution de la technologie.

143. Parmi d'autres possibilités, J. Clarence DAVIES, du WOODROW WILSON INTERNATIONAL CENTER FOR SCHOLARS, *op. cit.*, propose un ensemble de mesures, dont une loi spécifique pour gérer les risques associés aux nanotechnologies.

144. Comme le demande le Groupe canadien ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, par exemple. Voir « No Small Matter II: The Case for a Global Moratorium. Size Matters ! », *Occasional Paper Series*, vol. 7, n° 1, avril 2003 [en ligne] http://www.etcgroup.org/documents/Occ.Paper_Nanosafety.pdf.

145. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Incertitude et précaution : incidences sur les échanges et l'environnement*, Groupe de travail conjoint sur les échanges et l'environnement, 5 septembre 2002, p. 14 [en ligne] [http://www.oilis.oecd.org/olis/2000doc.nsf/4f7adc214b91a685c12569fa005d0ee7/98a7c482bccb43afc1256c2b003fe2ce/\\$FILE/JT00130908.PDF](http://www.oilis.oecd.org/olis/2000doc.nsf/4f7adc214b91a685c12569fa005d0ee7/98a7c482bccb43afc1256c2b003fe2ce/$FILE/JT00130908.PDF).

146. COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Pour une gestion éthique des OGM*, *op. cit.*, p. 54-56.

147. COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES – COMEST, *Le principe de précaution*, Paris, UNESCO, 2005, p. 23 [en ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001395/139578f.pdf>

148. *Ibid.*, p. 14.

En cas de risques de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement¹⁴⁹. » Au fil des ans, cette définition s'est étendue à d'autres domaines que l'environnement, notamment à la santé publique, et a été complétée dans certains cas par un ajout à saveur économique selon lequel les mesures préventives devaient être prises « à un coût économiquement acceptable¹⁵⁰ ».

Quelques mises au point

Quelles que soient les définitions retenues ou la terminologie utilisée, il existe une confusion majeure dans la compréhension du principe, confusion qui porte sur la notion de risque (en matière d'occurrence et de conséquences), de même que sur les distinctions à faire sur l'état des connaissances et entre les notions de prudence, de prévention et de précaution dans la prise de décision. Cette confusion se situe également autour de préjugés qui font du principe de précaution un principe paralysant, exigeant que toute absence de risque soit démontrée. C'est pourquoi, dans les paragraphes qui suivent, la Commission a jugé nécessaire de faire le point¹⁵¹.

Danger, risque, risque avéré, risque hypothétique. Un danger « menace ou compromet la sûreté, l'existence de quelqu'un ou de quelque chose » (*Le Robert*), alors que le risque « est un danger éventuel plus ou moins prévisible » (*Le Robert*). Selon ces définitions, il est possible de dire qu'un danger existe en soi, de façon absolue, mais que c'est la probabilité d'occurrence d'un danger qui en fait un risque. Le risque avéré est celui dont l'existence a été démontrée; toutefois, selon le cas, sa probabilité d'occurrence peut être calculée – de faible

à extrême, jamais nulle¹⁵² – ou non (dans un contexte d'incertitude scientifique, par exemple, comme celui de la grippe aviaire). Quant au risque hypothétique (ou potentiel), il n'est pas démontré – il peut d'ailleurs ne pas être démontrable; il ne permet pas un calcul de ses probabilités d'occurrence, mais est tout de même plausible sur la base du sens commun ou de l'expérience passée (il n'est pas l'expression d'une crainte farfelue). D'une certaine façon, c'est l'affirmation qu'il y a un risque qu'un risque existe... et que l'événement craint peut ne jamais se produire (attitude optimiste) ou, à l'extrême, qu'il se produira de façon quasi certaine (attitude catastrophiste). En matière d'hypothèse, il n'est pas inutile de souligner que toutes les hypothèses n'ont pas la même valeur et que ce n'est pas parce qu'une hypothèse de risque est formulée qu'il faut tenter de l'éviter à tout prix¹⁵³.

Risque déraisonnable, dommageable, irréversible, ou danger moralement inacceptable. Aux deux extrémités d'un continuum, les conséquences possibles (avérées ou hypothétiques) d'un risque peuvent être bénignes ou funestes, avec tout un spectre de possibilités entre les deux, allant du moins dommageable au plus dommageable. Pour l'UNESCO, « le danger moralement inacceptable est un danger pour les humains ou pour l'environnement qui est :

- menaçant pour la vie ou la santé humaine, ou bien
- grave et réellement irréversible, ou bien
- inéquitable pour les générations présentes ou futures, ou bien
- imposé sans qu'aient été pris dûment en compte les droits humains de ceux qui le subissent¹⁵⁴ ».

149. NATIONS UNIES, *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement*. Voir le texte en ligne à l'adresse suivante : <http://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm#three>.

150. Olivier GODARD, « Principe de précaution », *Nouvelle encyclopédie de bioéthique. Médecine. Environnement. Biotechnologie*, Gilbert Hottois et Jean-Noël Missa (dir.), Bruxelles, Éditions DeBoeck Université, 2001, p. 650.

151. Outre les documents cités dans le cadre de la présente section, le lecteur est également invité à consulter le texte suivant : INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG – IÖW, *Nanotechnology and Regulation within the Framework of the Precautionary Principle*, Final Report, Rüdiger HAUM et al., Berlin, février 2004.

152. Philippe KOURILSKY et Geneviève VINEY, *Le principe de précaution*, Rapport au Premier Ministre, Paris, 15 octobre 1999, p. 5 de la version pdf [en ligne] <http://www.ladocfrancaise.gouv.fr>.

153. Mark HUNYADI, « Qu'est-ce que le principe de précaution ? Nouvelles réflexions sur les usages du PP », Notes de présentation, Séminaire sur le principe de précaution, Commission de l'éthique de la science et de la technologie, 4 novembre 2005, p. 8.

154. COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES – COMEST, *Le principe de précaution*, op. cit., p. 14.

De toutes les notions qui définissent le principe de précaution, « le risque déraisonnable » est sans doute la plus difficile à cerner, la plus subjective, la moins liée à l'expertise scientifique et à la quantification mathématique. Combien de vies doivent être sacrifiées, combien de travailleurs doivent être atteints d'une maladie professionnelle et doivent voir leur espérance de vie diminuée, combien d'espèces animales ou végétales doivent disparaître, quel niveau de pollution l'air, l'eau et le sol doivent-ils atteindre pour qu'un risque soit qualifié de déraisonnable? L'irréversibilité est-elle un critère qui permet de répondre à toutes ces questions et à bien d'autres du même ordre? De telles préoccupations débouchent sur la perception du risque et son acceptabilité sociale qui nécessitent, selon l'OCDE, « une approche consensuelle du concept de précaution ; un cadre élargi d'analyse de la décision ; des processus participatifs et délibératifs de prise de décision¹⁵⁵ », une approche fondée sur l'éthique, en quelque sorte, car un jugement moral doit être porté sur l'acceptabilité du risque en fonction de valeurs socialement partagées.

État des connaissances : le savoir, l'incertitude, l'ignorance. À la base de la prise de décision pour déterminer l'existence d'un risque et en évaluer les probabilités d'occurrence, il y a l'état des connaissances, c'est-à-dire l'information disponible sur « les conséquences possibles d'une action, d'un produit ou d'un processus, afin de prendre les mesures nécessaires pour éviter ou atténuer tout dommage dans chacun des cas¹⁵⁶ ». De façon générale, à un certain niveau d'avancement d'une science ou de développement d'une technologie, les résultats de la recherche constituent un réservoir important du savoir accumulé sur le sujet et sur les conséquences possibles (positives ou négatives) des applications qui en découlent. Mais ce savoir peut aussi comporter des résultats de recherche incomplets, douteux, voire contradictoires sur certains objets de recherche, et créer de l'incertitude dans la détermination du risque. Enfin, il peut aussi arriver que certaines recherches n'aient jamais été faites ou qu'elles ne puissent se faire pour de multiples raisons (limites de l'instrumentation requise ou des modalités de recherche et d'expérimentation,

d'un corpus de recherche approprié, recours à des sujets humains, etc.) ; une zone d'ignorance (temporaire ou permanente) existe alors sur certains aspects du domaine et ne permet pas de déterminer la présence ou l'absence de risque dans l'utilisation qui se fait du savoir disponible à un moment donné de l'évolution d'une technologie.

Prudence, prévention et précaution. Ces notions fortement apparentées sont difficiles à distinguer sur le plan sémantique et contribuent à la confusion qui empêche une juste compréhension du principe de précaution : savoir dans quels cas et pour quels risques ou quelles hypothèses de risque il faut faire preuve de prudence, de prévention ou de précaution. C'est pourquoi, en raison de l'ensemble des points de vue, parfois contradictoires, qui ont cours sur le sujet, la Commission retient aux fins du présent avis la distinction qu'apporte Mark Hunyadi, estimant que celle-ci peut faciliter une prise de décision responsable : *agir avec prudence* pour les risques dont les répercussions et les probabilités d'occurrence sont connues, *recourir à la prévention* en situation d'incertitude, c'est-à-dire quand les risques sont connus mais non leurs probabilités d'occurrence (la grippe aviaire constituant ainsi l'exemple d'une situation où la prévention s'impose) et *s'en remettre à la précaution* quand seules des hypothèses existent et qu'il n'y a aucune information sur l'existence d'un risque et sur ses probabilités d'occurrence¹⁵⁷, ce qui peut être le cas pour certaines craintes dans une technologie émergente comme les nanotechnologies.

Les préjugés relatifs au risque zéro et à la paralysie de l'action. La crainte que se réalise le scénario du pire, l'espoir d'éliminer ou d'éviter tout danger qui pourrait nuire à la santé des gens et à l'environnement à court, moyen ou long terme peuvent être à l'origine de décisions qui auront pour but de ne prendre aucun risque et de refuser toute action susceptible d'entraîner un risque quelconque. De toute évidence, une telle position peut être intenable et mener à des aberrations : aucun progrès technologique n'aurait été possible au fil des siècles et la vie même s'avérerait impossible s'il fallait exiger une absence totale de risque. En revanche, aurait-

155. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents au XXI^e siècle*, op. cit., p. 100.

156. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Incertain et précaution...*, op. cit., p. 15.

157. Mark HUNYADI, op. cit., p. 8.

elle permis d'éviter des problèmes comme l'encéphalite spongiforme bovine (maladie de la vache folle) ou ceux causés par l'amiante, le DDT ou le téflon¹⁵⁸? Plutôt que de chercher à éviter tout risque, la question qui se pose est vraisemblablement de déterminer quels sont les risques acceptables. Quels peuvent être les effets néfastes du risque? Quelles en sont la portée et l'ampleur? Quelle en est la probabilité¹⁵⁹? Des questions auxquelles, cependant, il est difficile d'apporter des réponses dans le cas des risques qualifiés d'hypothétiques, puisque c'est l'ignorance à leur sujet qui les caractérise, et parfois des peurs qui peuvent se révéler irrationnelles... Est-ce à dire que la peur et l'absence de réponse doivent mener à l'abstention? L'imposition de moratoires est-elle la seule option possible? Quelles sont les avenues possibles pour que le principe de précaution conduise à l'action?

Des mesures pour l'action

Comme le souligne Olivier Godard, «l'apport original du principe de précaution est de poser une exigence de prise en charge précoce, dans le temps scientifique, de risques hypothétiques, non avérés, dont la réalisation pourrait avoir des conséquences graves et irréversibles; de tels risques échappent en théorie au principe de prévention, qui concerne des risques avérés par la connaissance scientifique ou par l'expérience¹⁶⁰».

La présente réflexion sur le principe de précaution et la volonté d'en faire un principe d'action, et non pas d'abstention, soulèvent *de facto* les questions suivantes, parmi bien d'autres: De quelle façon faut-il gérer les risques hypothétiques dans une société pluraliste et démocratique? Comment tenir compte de l'écart qui existe entre l'acceptabilité du risque individuel et celle du risque collectif, entre des exigences de sécurité sanitaire et environnementale et le souci légitime du développement technologique? De l'avis de la Commission,

il y a là matière à débat pour et avec la société. Entre-temps, cependant, à la fois pour orienter et alimenter ce débat, mais aussi pour permettre des actions concrètes et proactives au regard des nanotechnologies, la Commission propose quelques constats et quelques pistes de solution.

Des constats à prendre en considération. Les constats suivants sont signalés à titre indicatif dans le but de mener à l'adoption de mesures réalistes et responsables dans la prise de décisions concernant les risques relatifs aux nanotechnologies, qu'ils soient avérés ou hypothétiques:

- en raison des défis radicalement nouveaux que peuvent poser certaines des nouvelles technologies en émergence (dont les nanotechnologies et les biotechnologies) et de la transformation des modes de régulation des sociétés contemporaines et de la diversité des acteurs concernés dans un contexte de mondialisation, «des situations de risque nouvelles pourraient se trouver confrontées à une inertie excessive ou à des réponses inadéquates des institutions [...]»¹⁶¹;
- de plus en plus, les risques doivent être considérés de façon prospective en raison du caractère nouveau qu'ils présentent dans les technologies émergentes; c'est donc sur la base d'une évolution de la technologie plutôt que selon un historique des risques passés qu'il faut les aborder¹⁶², mais aussi de façon à tenir compte d'incidences relativement mineures qui pourraient déboucher sur un problème majeur après de nombreuses années¹⁶³ (le cas de l'amiante constitue un exemple à retenir);
- considérant que le risque zéro n'existe pas, les décideurs ne sont pas tenus d'assurer aux citoyens un environnement exempt de tout risque; ils doivent

158. Ces cas et d'autres du même genre ont été étudiés sous l'égide de l'Agence européenne de l'environnement et les résultats publiés dans INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT, *Signaux précoces et leçons tardives: le principe de précaution – 1896-2000*, Orléans, 2004 [en ligne] http://www.developpement.durable.sciences-po.fr/publications/Bibliographies/signaux_precoces.pdf.

159. À ce sujet, voir, entre autres, ORGANISME DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Incertitude et précaution...*, op. cit., p. 18.

160. Olivier GODARD, «Le principe de précaution et la proportionnalité face à l'incertitude scientifique», *Rapport public 2005: jurisprudence et avis de 2004. Responsabilité et socialisation du risque*, Conseil d'État, Paris, La Documentation française, 2005, p. 385.

161. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents au XXI^e siècle*, op. cit., p. 52.

162. *Ibid.*, p. 53.

163. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Incertitude et précaution...*, op. cit., p. 6.

cependant tenir compte de l'incertitude scientifique et de l'ignorance qui peut exister relativement à des hypothèses de risque et prendre des mesures responsables, dont la précaution¹⁶⁴;

- la prise en considération des aspects sociétaux du risque est fondamentale et son acceptabilité par les citoyens constitue une notion clé dans le processus d'évaluation et de gestion du risque¹⁶⁵; en l'occurrence, le principe de précaution « impose de toute évidence qu'on améliore la communication et la réflexion sur les divers niveaux et types d'incertitude dans l'évaluation scientifique¹⁶⁶ »;
- le recours au principe de précaution ne remplace pas l'évaluation scientifique du risque et n'a pas pour but la mise en place de mesures protectionnistes permettant de passer outre à des accords commerciaux de libre échange¹⁶⁷.

En complément à ces constats issus de la documentation consultée, **la Commission croit utile de mentionner l'importance de considérer, dans une perspective éthique, les conséquences qui peuvent découler du refus d'accepter une part de risque, notamment en ce qui a trait à des bénéfices valables que la population pourrait retirer des avancées technologiques et des utilisations commerciales qui en découlent.**

Des exemples de mesures de précaution. Les mesures à considérer « sont des interventions entreprises avant que le danger ne survienne et visant à éviter ou à diminuer celui-ci. Les actions choisies doivent être proportionnelles à la gravité du danger potentiel, prendre en considération leurs conséquences positives et négatives et comporter une évaluation des implications morales tant de l'action que de l'inaction. Le choix de l'action doit être le résultat d'un processus participatif¹⁶⁸. » Ces mesures peuvent être de nature différente, s'appliquer simultanément ou successivement, selon le cas, et ne sont donc pas

mutuellement exclusives. Dans l'esprit du présent texte, qui limite le recours au principe de précaution à une situation d'ignorance ou de très grande incertitude, la Commission estime utile de signaler les quelques mesures suivantes, dont l'objectif principal est de gérer une telle situation :

- miser sur la recherche constitue évidemment la première mesure qui permette de contrer l'ignorance et une grande incertitude; tout en étant multidisciplinaire, en raison de la nature même des nanotechnologies, la recherche doit aussi être interdisciplinaire afin de favoriser un croisement des différents savoirs, y compris ceux issus des sciences sociales et humaines;
- recourir à des mécanismes de participation et de consultation des citoyens afin de déterminer l'acceptabilité sociale des risques hypothétiques ou des risques avérés dont le degré d'incertitude est très élevé;
- se doter de moyens de contrôle et de suivi des résultats de recherche ou d'incidences d'effets négatifs, même mineurs, qui permettraient de détecter tôt une situation potentiellement dangereuse ou néfaste;
- légiférer pour imposer les interdictions et les restrictions nécessaires, voire un moratoire sur certaines pratiques.

Dans les prochains chapitres, au fur et à mesure que seront présentés et discutés un certain nombre des enjeux éthiques relatifs aux nanotechnologies, et que seront signalées l'ignorance ou la grande incertitude qui existent en ce qui a trait à leurs effets possibles sur la santé et sur l'environnement – notamment pour les nanoparticules –, la Commission pourra s'appuyer sur les constats et les mesures d'action ci-dessus pour formuler ses recommandations à l'intention des divers acteurs concernés.

164. *Ibid.*, p. 29 et 30.

165. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents...*, op. cit., p. 98.

166. COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES – COMEST, *Le principe de précaution*, op. cit., p. 35.

167. ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents...*, op. cit., p. 18.

168. COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES – COMEST, *Le principe de précaution*, op. cit., p. 14.

L'approche « cycle de vie » dans la perspective du développement durable

En 1997, était adoptée la norme internationale ISO 14040 (de la série 14000¹⁶⁹) sur l'analyse du cycle de vie, principes et cadre, en matière de gestion environnementale. L'année suivante, Environnement Canada publiait un document sur le sujet, *Gestion du cycle de vie environnementale [sic] : Un guide des meilleurs [sic] décisions commerciales*, accompagné de la définition suivante : « Le concept du cycle de vie est en fait une approche axée sur l'ensemble des étapes de la « vie » des produits, procédés et services. Selon ce concept, toutes les étapes du cycle de vie (extraction et traitement des matières premières, fabrication, transport et distribution, utilisation et réemploi, recyclage et gestion des déchets) ont une incidence sur l'environnement et l'économie¹⁷⁰. »

Sur la scène internationale, l'intérêt est manifeste pour la prise en compte du cycle de vie en ce qui concerne les nanotechnologies. En témoignent, par exemple, le sixième programme-cadre de l'Union européenne¹⁷¹, le rapport

commun de la Royal Society et de la Royal Academy of Engineering en Grande-Bretagne¹⁷², un avant-projet de livre blanc de l'agence américaine EPA¹⁷³ (Environmental Protection Agency) et un mémoire préparé par le California Council on Science and Technology¹⁷⁴. Dans ce dernier cas, cependant, c'est surtout la production industrielle de composants nanométriques qui justifie l'intérêt accordé à la question du cycle de vie des produits, notamment en ce qui a trait à la protection des travailleurs de l'industrie, mais aussi de l'environnement, en raison de la possibilité que les nanocomposites s'accumulent dans l'environnement au fil du temps¹⁷⁵.

Une telle préoccupation est de plus en plus manifeste dans la perspective du développement durable, comme en témoigne d'ailleurs la nouvelle *Loi sur le développement durable*¹⁷⁶. Qu'il s'agisse de la pensée¹⁷⁷ ou de l'approche¹⁷⁸ cycle de vie ou, plus concrètement, de la gestion¹⁷⁹ ou de l'analyse¹⁸⁰ du cycle de vie (ACV) (voir l'encadré), l'objectif fondamental qui est recherché est celui de la protection de l'environnement à partir d'une prise en compte des impacts d'une innovation

169. À l'intention du lecteur, précisons que « la série ISO 14000 a pour principal objectif de promouvoir dans les établissements une gestion à la fois plus efficace et plus rentable de l'environnement et de proposer des instruments utiles et utilisables (efficaces par rapport à leur coût, basés sur des systèmes, souples, reflétant les meilleures pratiques disponibles en matière d'organisation) en vue de recueillir, interpréter et communiquer l'information relative à l'environnement. Il s'agira, en dernière analyse, d'améliorer la performance dans les domaines de l'environnement. » Voir <http://www.intracen.org/tcd/Export%20Quality%20Bulletins/eq53fre.pdf>, p. 4.

170. Voir <http://www.ec.gc.ca/ecocycle/fr/whatislcm.cfm> pour un aperçu du document.

171. UNION EUROPÉENNE, « Sixième Programme-cadre : Nanotechnologies et nanosciences » [en ligne] <http://europa.eu.int/scadplus/leg/fr/lvb/i23015.htm>.

172. *Op. cit.*

173. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (États-Unis), *op. cit.*

174. CALIFORNIA COUNCIL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, *Nanoscience and Nanotechnology. Opportunities and Challenges in California*, A Briefing for the Joint Committee on Preparing CA for the 21st Century, California, janvier 2004 [en ligne] http://www.larta.org/lavox/articlelinks/2004/040223_nanoreport.pdf.

175. « It is the transition to large-scale commercial manufacturing of these materials that is the primary concern, not the small amounts of material produced in the research process. The exposure of workers to nanoparticulates will require investigation, and potential regulation as with chemicals found to be hazardous but useful. With large production quantities, it will also be important to study the full lifecycle of these materials, including the associated process of producing them, their use, and eventual disposal. Nano-composites, for example, may be more difficult and more energy-intensive to recycle than single-phase material, and may accumulate in the environment over time. Since environmental impacts may be slow to develop and ascertain, one of the challenges will be to determine what needs to be monitored over the course of time as an important and relevant effect. » *Ibid.*, p. 108.

176. GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur le développement durable*, *op. cit.*

177. Gisèle BELEM, « L'analyse du cycle de vie comme outil de développement durable », sous la direction de Jean-Pierre Revéret et Corinne Gendron, *Les cahiers de la Chaire*, collection recherche, Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, n° 08-2005 [en ligne] <http://www.crsdd.uqam.ca/pdf/pdfCahiersRecherche/08-2005.pdf>.

178. CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RÉFÉRENCE SUR L'ANALYSE, L'INTERPRÉTATION ET LA GESTION DU CYCLE DE VIE DES PRODUITS, PROCÉDÉS ET SERVICES – CIRAIG, *Mémoire*, dans le cadre de la consultation sur le projet de Plan de développement durable du Québec et de l'Avant-projet de Loi sur le développement durable, février 2005 [en ligne] http://www.polymtl.ca/ciraig/Memoire_CIRAIG_DD.pdf.

179. *Ibid.*

180. *Ibid.* et Gisèle BELEM, *op. cit.*

technologique « du berceau à la tombe¹⁸¹ » (ou « *from cradle to grave*¹⁸² »), c'est-à-dire dès l'obtention des ressources nécessaires à sa fabrication jusqu'à son élimination finale une fois terminée sa vie utile.

Le cycle de vie

« Le concept de "Pensée cycle de vie" s'avère [...] être une philosophie de gestion permettant aux outils qui s'en inspirent d'avoir la capacité de couvrir l'ensemble du cycle de vie et d'éviter ainsi que des améliorations environnementales locales ne soient que la résultante d'un déplacement des charges polluantes dans le temps ou dans l'espace. La concrétisation de cette Pensée au niveau de l'entreprise nécessite la combinaison d'outils dont l'usage, dans le cadre de la gestion du cycle de vie, confère une certaine discipline de gestion. [...] Ainsi, dans un objectif de durabilité, la Pensée cycle de vie prône une approche systémique pour la résolution des problèmes de pollution à la source ainsi que pour l'usage efficace des ressources. [...] »

Gisèle BELEM¹⁸³

« "L'approche cycle de vie" est une démarche qui intègre l'ensemble des stratégies de consommation et de production existantes, par opposition à une démarche fragmentaire. De cette approche découle la "gestion du cycle de vie" des produits et services, soit un ensemble d'outils des plus performants permettant à une entreprise ou à un gouvernement d'opérer dans un contexte de développement durable. Parmi ces outils, on trouve l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits et services, dont la méthodologie est régie par les normes ISO 14040 et suivantes, et qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service, voire même d'une réglementation, en considérant toutes les étapes relatives à ce produit ou à ce service et ce, de l'extraction des matières premières jusqu'à la disposition en fin de vie utile. L'ACV doit toutefois, en parallèle, être complétée par une analyse des impacts sociaux et économiques pour orienter le développement durable. Ainsi complétée, l'ACV

devient un puissant outil d'aide à la décision, permettant d'identifier le meilleur compromis possible entre les aspects environnementaux, sociaux et économiques relativement au choix d'un produit, d'un service, d'une politique ou d'une réglementation. »

CIRAIG¹⁸⁴

« Le parent pauvre de l'ACV [analyse du cycle de vie] reste la dimension sociale et avec elle la condition de la démocratie. Celle-ci est acceptée de manière générale comme élément indispensable à la prise de décision mais l'intégration des critères sociaux dans la méthodologie de l'ACV reste problématique, principalement selon les acteurs, pour des raisons d'objectivité compte tenu du caractère scientifique de l'outil. »

Gisèle BELEM¹⁸⁵

La notion de développement durable est entendue ici dans le sens qui lui est donné dans la loi : « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Le développement durable s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement¹⁸⁶. » Ainsi que le mentionnait un document de consultation antérieur à la loi¹⁸⁷, « cette définition s'inspire à la fois :

- de la définition initiale du rapport Brundtland, de laquelle elle reprend la notion d'équité intergénérationnelle ;
- de la définition bonifiée établie en 1991 par l'UICN, le PNUE et le WWF, de laquelle elle reprend la notion d'amélioration des conditions d'existence ;
- du consensus international retenant l'environnement, la société et l'économie comme les trois dimensions fondamentales du développement durable¹⁸⁸.

181. UNION EUROPÉENNE, « Sixième Programme-cadre : Nanotechnologies et nanosciences », *op. cit.*

182. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 32.

183. Gisèle BELEM, *op. cit.*, p. 7 et 11.

184. CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RÉFÉRENCE SUR L'ANALYSE, L'INTERPRÉTATION ET LA GESTION DU CYCLE DE VIE DES PRODUITS, PROCÉDÉS ET SERVICES – CIRAIG, *op. cit.*, p. 3.

185. Gisèle BELEM, *op. cit.*, p. 44.

186. Article 2 de la *Loi sur le développement durable*, GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *op. cit.*

187. GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Plan de développement durable du Québec*, document de consultation, novembre 2004, p. 19 [en ligne] <http://www.mddep.gouv.qc.ca/developpement/2004-2007/plan-consultation.pdf>.

188. *Ibid.*

Bien qu'il en soit question à deux reprises dans la loi – relativement à l'internalisation des coûts (article 6, alinéa *p*) et en vue de la préparation d'une stratégie gouvernementale de développement durable (article 11, alinéa 2) –, la définition retenue ne fait cependant pas référence à la notion de cycle de vie que certains estiment « essentielle à l'atteinte d'un développement durable¹⁸⁹ ».

Recommandation n° 1

La Commission recommande :

que le gouvernement du Québec, guidé par le principe de précaution et dans une perspective de développement durable, se préoccupe de toutes les phases du cycle de vie d'un produit issu des nanotechnologies ou comportant des éléments nanométriques et qu'à cet effet il intègre la notion de « cycle de vie » dans toutes ses politiques où une telle approche est appropriée, de façon à éviter toute conséquence dommageable d'une innovation technologique sur la santé et sur l'environnement.

189. CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RÉFÉRENCE SUR L'ANALYSE, L'INTERPRÉTATION ET LA GESTION DU CYCLE DE VIE DES PRODUITS, PROCÉDÉS ET SERVICES – CIRAIG, *op. cit.*, p. 7.

Chapitre 3

Nanotechnologies : préoccupations d'ordre éthique

La réflexion de la Commission sur les enjeux éthiques des nanotechnologies l'amène d'abord à formuler des exigences qui lui apparaissent fondamentales pour une gestion responsable du domaine : l'établissement d'une nomenclature propre à la nanoscience et aux nanotechnologies, le développement de la nanométrie pour l'élaboration de standards internationaux et la poursuite de la recherche ainsi que la diffusion de ses résultats. Une fois précisées ces prémisses, la Commission présente dans un premier temps un certain nombre de préoccupations éthiques relatives aux produits issus des nanotechnologies, notamment en ce qui a trait à la santé, à l'environnement et à la sécurité. Dans un deuxième temps, elle soulève un questionnement éthique plus large mis en évidence par le développement des nanotechnologies, mais qui concerne également d'autres technologies émergentes, comme les biotechnologies et la génomique. Les questions abordées sont relatives à la gouvernance, à l'activité économique et à l'exercice de la citoyenneté. Il importe de prendre conscience de l'ensemble de ces préoccupations dès maintenant et d'intervenir le plus tôt possible afin que les promesses soulevées par l'émergence de ces nouvelles technologies puissent se réaliser au bénéfice de la société et de ses citoyens et non à leur détriment.

Des exigences fondamentales comme prémisses

Depuis le discours désormais célèbre de Feynman sur le monde de l'infiniment petit¹⁹⁰, le domaine de la nanoscience et des nanotechnologies s'est développé à travers la convergence de disciplines comme la physique, la chimie, la biologie, les sciences de l'information et de la communication, les sciences cognitives et autres disciplines bien établies. Le caractère nouveau du domaine et l'apport de nombreuses disciplines à son émergence font en sorte que des actions s'imposent comme prémisses à son développement systématique et responsable. Ces actions concernent la mise au point d'une terminologie et d'une nomenclature communes, de procédures et de standards, ainsi que la poursuite de recherches visant à combler les lacunes actuelles sur les conséquences sanitaires et environnementales des nanotechnologies.

La nécessité d'établir une terminologie et une nomenclature scientifiques communes

La mise en commun de savoirs provenant de disciplines différentes et l'arrivée de nouvelles connaissances soulèvent la question de l'harmonisation de la terminologie

scientifique (c'est-à-dire : s'entendre sur la définition des termes utilisés) et de la nomenclature scientifique (c'est-à-dire : s'entendre sur les règles d'attribution d'un nom à un ensemble d'objets jugés semblables) qui sont consacrées au monde des nanotechnologies. Il s'agit d'une question complexe, car la nomenclature scientifique actuelle est fondée sur la *taille* et sur la *composition chimique* des nanoparticules, mais ne tient pas compte des spécificités de la matière nanométrique en ce qui a trait à sa *structure physique*, comme celle des nanotubes de carbone ou des fullerènes, ni des *effets de surface* qui lui sont propres. Dans un rapport de 2005, l'Institute of Medicine américain mentionne d'ailleurs qu'il reste encore à déterminer si ces particules sont de nouvelles substances ou non¹⁹¹.

Le flou terminologique et l'absence d'une nomenclature scientifique partagée par les divers acteurs du domaine – perceptibles dans le travail de recherche et de diffusion de travaux scientifiques – témoignent de la créativité et de la vitesse de génération des connaissances. Sans être considérée comme un handicap en recherche fondamentale, l'absence d'un vocabulaire scientifique uniformément partagé pourrait éventuellement nuire au développement du domaine. Pour assurer le transfert des connaissances

190. Richard P. FEYNMAN, « There is plenty of room at the bottom : An Invitation to Enter a New Field of Physics », *Engineering and Science*, vol. 23, n° 5, 1960 [en ligne] <http://clsdemo.caltech.edu/archive/00000047/02/1960Bottom.pdf>.

191. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. xii.

à des fins de formation, faciliter la communication entre des scientifiques issus de formations et de cultures différentes mais aussi avec la population, faciliter également la mise au point et la mise en marché de nouveaux produits de consommation ou l'encadrement du secteur, il importe de pouvoir s'appuyer sur une terminologie et sur une nomenclature convenues entre les divers acteurs du domaine et reconnues à l'échelle internationale¹⁹². Une telle systématisation aurait de nombreux autres avantages : elle permettrait de répertorier plus facilement les articles publiés dans les diverses revues spécialisées et susceptibles de traiter de nanoscience et de nanotechnologies ; elle faciliterait la vulgarisation pour les médias et les non-initiés tout en favorisant l'établissement d'un dialogue avec le public. Enfin, elle contribuerait à clarifier la réglementation qui pourrait s'appliquer aux activités nanotechnologiques ; les acteurs concernés sauraient ainsi aisément à quoi la loi fait référence¹⁹³, notamment lors de contentieux juridiques.

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a créé, en 2005, trois comités voués à l'élaboration de normes relatives à « la terminologie et la nomenclature, la métrologie et l'instrumentation, y compris les spécifications relatives aux matériaux de référence ; les méthodologies d'essai ; la modélisation et la simulation ; et les pratiques à fondement scientifique en matière de santé, de sécurité et d'environnement¹⁹⁴ ». Le Canada préside d'ailleurs le comité sur la terminologie et la nomenclature. Les résultats de ces efforts concourront fort certainement à la prise de décision éclairée en matière de recherche, d'encadrement, d'utilisation, de production et de consommation des nanotechnologies.

Il importe de souligner que le Québec, pour sa part, occupe une position privilégiée pour contribuer à la mise au point et à la diffusion d'une terminologie francophone pouvant accompagner un développement scientifique et commercial qui se réalise en grande partie en anglais. D'ailleurs, dans le cadre des travaux réalisés pour la préparation du présent avis, s'est instaurée une collaboration entre NanoQuébec et l'Office québécois de la langue française qui a conduit à la diffusion d'un vocabulaire des nanotechnologies sur le site même de NanoQuébec, en plus de celui qui se trouve dans *Le grand dictionnaire terminologique* de l'Office. L'OQLF travaille également en partenariat avec divers pays européens en vue d'élaborer un vocabulaire multilingue des nanotechnologies.

L'importance de mettre sur pied des procédures et des standards

Pour déterminer des niveaux de risque acceptables, il faut être en mesure de répertorier et de quantifier les dangers potentiels, que ce soit pour la santé humaine ou pour l'environnement. À l'heure actuelle, « la science ne dispose pas de méthodologies permettant d'évaluer la toxicité de l'ensemble de ces nouveaux produits dans de courts délais et avec des coûts raisonnables¹⁹⁵ ». En outre, les tests utilisés ne permettent pas toujours de déterminer quelle propriété physique d'un composant nanotechnologique donné est responsable de la toxicité du matériau examiné¹⁹⁶. Enfin, il sera difficile de déterminer si un produit comportant un nouveau composant nanométrique doit être testé à nouveau, alors que le produit d'origine a déjà été homologué¹⁹⁷.

192. Voir, entre autres, EUROPEAN COMMISSION. COMMUNITY HEALTH AND CONSUMER PROTECTION, *Nanotechnologies : A Preliminary Risk Analysis...*, op. cit., p. 24-25 [en ligne] http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm ; Jean-Pierre DUPUY et François ROURE, *Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle*, Tome 1, Conseil général des mines et Conseil général des technologies de l'information, section « Innovation et Entreprise », 15 novembre 2004, p. 5 [en ligne] <http://www.cgm.org/themes/deveco/develop/nanofinal.pdf> ; MERIDIAN INSTITUTE et NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, *International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology*, Virginie, 17-18 juin 2004, p. 8 et 11 [en ligne] http://www.nanoandthepoor.org/Final_Report_Responsible_Nanotech_RD_040812.pdf.

193. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), op. cit., p. 42-43 ; SWISS RE, op. cit., p. 85.

194. INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION – ISO, « L'ISO lance des travaux sur les normes relatives aux nanotechnologies », Communiqué de presse, 28 novembre 2005 [en ligne] <http://www.iso.org/iso/fr/commcentre/pressreleases/archives/2005/Ref980.html>.

195. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé...*, op. cit., p. iii.

196. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), op. cit., p. 48.

197. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (États-Unis), op. cit., p. 26.

D'où l'importance de mettre sur pied des procédures et des standards afin de :

- permettre de répliquer et de tester la validité des hypothèses et des résultats de la recherche en nanotechnologies ;
- faciliter l'analyse de risque et le contrôle de la qualité ; et
- rendre possible l'élaboration adéquate d'exigences en matière de santé et de sécurité.

Il faut cependant reconnaître que ces procédures et ces standards ne pourront être élaborés, comme le souligne l'Environmental Protection Agency américaine, tant qu'il n'y aura pas de conventions adéquates concernant la nomenclature¹⁹⁸ et des instruments nanométriques aptes à fournir des mesures constantes et uniformes.

La poursuite de la recherche et la diffusion des résultats

Alors que des incertitudes subsistent en ce qui a trait à leur innocuité, il existe également très peu de directives concernant, par exemple, la façon de se départir des produits contenant des nanoparticules¹⁹⁹. L'un des problèmes importants signalés dans la littérature est l'insuffisance de données en ce qui concerne les nanoparticules de synthèse ; les intervenants dans le domaine déconseillent de se fier seulement aux données existantes, qui concernent principalement les nanoparticules naturelles* et résiduelles*²⁰⁰. Ainsi que le mentionne le rapport de l'IRSST à propos des effets sur la santé liés aux nanoparticules, « les données toxicologiques spécifiques aux nanoparticules demeurent insuffisantes à cause du faible nombre d'études, de la courte période d'exposition, de la composition

différente des nanoparticules testées (diamètre, longueur et agglomération), [...] etc.²⁰¹ ». Il est tout de même intéressant de constater qu'au cours de l'été 2005 l'International Council on Nanotechnology (ICON) a créé une banque d'articles portant sur les impacts sanitaires et environnementaux des nanomatériaux²⁰². Ce répertoire de publications scientifiques a pour objectif principal d'aider les chercheurs et les agences gouvernementales à prendre des décisions éclairées en ce qui a trait à la sécurité des nanomatériaux²⁰³.

La plupart des préoccupations rapportées lors des consultations organisées dans le cadre de l'avis de la Royal Society en Grande-Bretagne ont porté sur les effets possibles des nanoparticules et des nanotubes manufacturés sur la santé et la sécurité des personnes, de la faune, de la flore et des écosystèmes. En particulier, le fait que les nanoparticules soient du même ordre de grandeur que les composants cellulaires et les grosses protéines a conduit à l'hypothèse qu'elles pourraient échapper aux défenses naturelles des organismes vivants et endommager leurs cellules²⁰⁴. Le constat est le même de ce côté de l'Atlantique ; les témoins reçus le 17 novembre 2005 par le Committee on Science américain sur la sécurité et les impacts environnementaux des nanotechnologies ont demandé un effort de recherche plus important à cet égard : « [...] si les nanotechnologies devaient remplir leur énorme potentiel économique, alors nous devons investir immédiatement dans la compréhension des problèmes qu'elles pourraient causer. C'est le moment d'agir – alors que nous avons un consensus entre gouvernements, industriels et environnementalistes²⁰⁵. » Les questions d'impacts environnementaux et de santé, donc, mais également les impacts économiques et sociaux sont encore à documenter.

198. *Ibid.*

199. SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, *op. cit.*, p. 2.

200. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 2.

201. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé...*, *op. cit.*, p. iii.

202. Accessible à l'adresse suivante : <http://icon.rice.edu/research.cfm>.

203. INTERNATIONAL COUNCIL ON NANOTECHNOLOGY, « Nano Coalition Unveils Environmental, Health and Safety Database », Communiqué de presse, Houston, 19 août 2005 [en ligne] http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=11111.

204. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 35. Le rapport tient à mettre en perspective cet enjeu, en commentant que l'être humain a toujours été exposé à divers types de nanoparticules provenant de sources naturelles, comme la photochimie ou les feux de forêt, et que l'exposition à des millions de nanoparticules polluantes par inhalation est chose courante depuis la première utilisation du feu.

205. (Traduction libre) COMMITTEE ON SCIENCE (États-Unis), « More research on environmental [sic], safety impacts of nanotechnology is critical to success of the industry, witnesses say », Communiqué, Washington, 17 novembre 2005 [en ligne] <http://www.house.gov/science/press/109/109-165.htm>.

Il apparaît alors important d'intensifier les efforts de recherche afin de produire rapidement une caractérisation normalisée des produits issus des nanotechnologies, certains étant déjà commercialisés. Il faut également souligner la nécessité de favoriser l'accès aux résultats de recherche, tant pour la communauté scientifique que pour les décideurs et les citoyens, sujet qui sera abordé plus loin dans ce chapitre.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Le constat premier que tout observateur peut faire à l'égard des nanotechnologies, c'est le manque flagrant d'information pour bien connaître ce qu'elles sont. Or, comment prendre des décisions éclairées, en tant que législateur, chercheur, entrepreneur, travailleur ou citoyen, s'il n'existe pas une compréhension commune de ce que sont les nanotechnologies? Établir une terminologie et une nomenclature scientifiques communes, mettre sur pied des procédures et des standards et poursuivre la recherche et la diffusion des résultats apparaissent à la Commission comme les trois prémisses indispensables à une gestion responsable du développement des nanotechnologies.

Préoccupations éthiques associées aux produits issus des nanotechnologies

Par leur diversité, les produits issus des nanotechnologies soulèvent des questions d'ordre éthique qu'il importe de considérer à leur juste valeur. D'entrée de jeu, la Commission se préoccupe des effets que la recherche et l'innovation nanotechnologiques pourraient avoir sur la santé humaine et sur l'environnement. Elle s'interroge ensuite sur les utilisations auxquelles pourraient se prêter les nanotechnologies en matière de défense nationale et de sécurité civile et y décèle matière à un questionnement éthique d'importance. Enfin, la Commission soulève la question des possibilités qu'offre le développement des nanotechnologies pour transformer l'être humain et la nature afin de souligner les préoccupations qui en découlent en matière d'identité humaine et dans les rapports que l'être humain entretient avec la nature.

En matière de santé humaine

Les principales questions d'éthique retenues par la Commission en ce qui a trait à la santé humaine concernent la santé et la sécurité des travailleurs et des consommateurs et les applications des nanotechnologies dans le domaine de la médecine – en particulier la recherche biomédicale,

les outils de diagnostic ainsi que les applications thérapeutiques.

Santé et sécurité

Au même titre que les nanoparticules naturelles et résiduelles, les nanoparticules de synthèse sont susceptibles de provoquer des effets indésirables sur la santé. Les personnes touchées au premier chef sont celles qui produisent, manipulent, utilisent ou éliminent les nanoparticules. Dans un contexte où s'accroît la recherche en nanotechnologies et la fabrication industrielle de produits qui en sont issus, la Commission s'interroge sur la santé et la sécurité des travailleurs du domaine. Mais elle s'interroge aussi quant aux effets possibles sur la santé et la sécurité des personnes qui consommeront ou utiliseront les produits issus des nanotechnologies, c'est-à-dire la population en général.

La protection des travailleurs

Les propriétés des nanotechnologies suscitent des questionnements particuliers au regard de la santé et de la sécurité de ceux qui seront en contact étroit avec leur développement, c'est-à-dire les travailleurs. Ceux-ci comprennent tout personnel qui manipule des substances de taille nanométrique : chercheurs, étudiants, employés de laboratoire et l'ensemble des travailleurs engagés dans l'assemblage, le transport, la réparation, l'utilisation, le recyclage ainsi que l'élimination de produits issus des nanotechnologies – bref, toute personne que son travail met en contact avec des composants nanométriques à n'importe quelle étape du cycle de vie d'un produit qui en comporte.

Ainsi qu'il a été mentionné dans le premier chapitre, ce sont surtout les caractéristiques (taille, toxicité potentielle, mobilité, propriété de surface) propres aux nanomatériaux qui soulèvent un questionnement sur les conséquences sanitaires et sécuritaires associées à leur production et à leur manipulation. Les principales valeurs qui sous-tendent ce questionnement sont la dignité humaine et la responsabilité. La protection de la dignité humaine implique que les travailleurs ne soient pas considérés seulement comme des moyens de production, mais d'abord et avant tout comme des êtres humains, et qu'en ce sens ils aient droit à l'intégrité et au respect de leur personne. Quant à la responsabilité, elle suppose que l'État et les employeurs s'assurent de la mise en place d'un environnement sécuritaire pour

les travailleurs, mais aussi que ces derniers respectent les règles et mécanismes de sécurité en vigueur et contribuent à leur amélioration.

Deux observations ont attiré l'attention de la Commission. En premier lieu, il faut s'inquiéter du peu de recherches entreprises jusqu'à maintenant en ce qui concerne les conséquences possibles des nanomatériaux sur la santé et la sécurité humaines²⁰⁶. L'état des connaissances est peu avancé; beaucoup de recherches en écotoxicologie devront être menées afin d'évaluer la toxicité de ces nouvelles particules et également connaître les propriétés de surface qui peuvent entraîner la toxicité²⁰⁷. L'un des obstacles notés par l'IRSST et qui expliquent en partie le manque de connaissances en hygiène industrielle est que «les outils actuels d'évaluation de l'exposition des travailleurs normalement utilisés [...] sont mal adaptés à l'application aux nanoparticules en milieu de travail²⁰⁸», alors que «les quelques données disponibles suggèrent que les expositions peuvent être substantielles lors de la manipulation²⁰⁹».

En second lieu, les spécialistes ne s'entendent pas sur l'à-propos de la réglementation existante. Selon certains, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de mécanismes qui réglementent ces nouveaux objets alliant les propriétés classiques et les propriétés quantiques de la matière – les instruments actuels seraient axés essentiellement sur l'état original des matériaux²¹⁰. Pour d'autres, la réglementation couvre en bonne partie la production nanotechnologique, notamment en ce qui concerne l'hygiène industrielle; des amendements devraient cependant être apportés afin de mentionner clairement que la réglementation en vigueur vise les nanotechnologies²¹¹. Il sera difficile de trancher sur cette question tant que des données plus précises sur les effets potentiels des nanotechnologies ne seront pas disponibles.

En attendant l'avancement de la recherche et une réglementation plus complète et mieux adaptée aux spécificités des nanotechnologies, la Commission estime que le principe de précaution doit guider les actions à entreprendre afin de protéger la santé et la sécurité des travailleurs. Cette responsabilité de la protection des travailleurs incombe :

- aux employeurs, qui doivent identifier, contrôler et éliminer les dangers, doter leurs établissements d'équipements, d'outils et de méthodes de travail sécuritaires et s'assurer que les travailleurs respectent les mesures de protection mises en place;
- aux travailleurs, qui doivent prendre les mesures nécessaires pour protéger leur santé, leur sécurité et celle de leur entourage au travail, et participer à l'identification et à l'élimination des risques au travail;
- au gouvernement et, plus spécifiquement, à la Commission de la santé et de la sécurité au travail, qui doit veiller à ce que les normes et la réglementation existantes soient respectées²¹².

Des actions à entreprendre

Le risque qu'adviennent des conséquences inattendues et indésirables dépend du degré de toxicité des nanotechnologies et du niveau d'exposition aux nanoparticules; d'où l'importance d'établir des normes particulières en santé et sécurité au travail. Aux États-Unis, le President's Council of Advisors on Science and Technology estime que les chercheurs doivent être au courant des dangers (*hazards*) potentiels lorsqu'ils travaillent avec des nouveaux matériaux qui possèdent des propriétés encore méconnues²¹³. L'IRSST recommande pour sa part que soient instaurées des mesures strictes de prévention afin d'empêcher le développement de maladies professionnelles²¹⁴.

206. Christopher J. PRESTON, «The Promise and Threat of Nanotechnology. Can Environmental Ethics Guide US?», *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, Special issue on nanotech challenges, part II, vol. 11, n° 1, section 4.1 [en ligne] <http://www.hyle.org/journal/issues/11-1/preston.htm>.

207. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 42.

208. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les nanoparticules...*, *op. cit.*, p. iv.

209. *Ibid.*

210. Christopher J. PRESTON, *op. cit.*

211. J. Clarence DAVIES, *op. cit.*, p. 17.

212. Pour plus d'information sur les droits et les responsabilités des employeurs et des travailleurs, se référer au site de la Commission de la santé et de la sécurité du travail, notamment la section sur la prévention [en ligne] <http://www.csst.qc.ca/portail/fr/prevention/prevention.htm>.

213. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *op. cit.*, p. 35.

214. INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé...*, *op. cit.*, p. iii.

La publication de guides de bonnes pratiques ou d'ouvrages tels que ceux produits par l'IRSST relativement à l'état des connaissances sur les nanoparticules et aux effets possibles de ces particules sur les travailleurs s'inscrit au nombre des actions qui peuvent être entreprises pour assurer une gestion responsable des nanotechnologies. À cet effet, **la Commission souligne l'importance que les données colligées par l'IRSST demeurent le plus à jour possible et que ces informations soient transmises aux entreprises et aux centres de recherche actifs dans le domaine des nanotechnologies, afin que ces derniers puissent prendre des mesures adéquates de protection des travailleurs.** En ce sens, elle appuie le commentaire suivant, formulé par l'IRSST : « Le développement d'une expertise québécoise en nanotoxicologie devrait être encouragé et axé principalement sur l'étude des produits développés et importés au Québec, afin de conseiller et soutenir les divers intervenants en santé et sécurité du travail, les entreprises ainsi que ceux concernés par la recherche et le développement des produits issus de la nanotechnologie²¹⁵. »

Par ailleurs, il faut souligner que le gouvernement du Canada a commandé plusieurs études sur les effets potentiels des nanotechnologies ainsi que sur la gouvernance²¹⁶. Un comité interministériel – comprenant des représentants de Santé Canada, d'Environnement Canada, de l'Agence canadienne d'inspection des aliments, de Pêches et Océans Canada, du Bureau du conseiller national des sciences ainsi que du Conseil national de recherches Canada – a tenu un atelier les 29 et 30 mars 2006 afin de réfléchir sur les effets potentiels des nanotechnologies sur la santé et l'environnement. Le comité, qui continue de se réunir, projette de lancer un plan d'action fédéral à

l'automne 2006, dont l'un des objectifs est d'augmenter les connaissances sur les propriétés des nanotechnologies, sur leurs effets et sur le niveau d'exposition aux nanoparticules. Des actions qui pourraient être entreprises, voire menées à terme à l'intérieur d'une même année, sont également explorées. Certaines de ces actions devraient déboucher sur un meilleur encadrement des activités dites occupationnelles²¹⁷.

Aux États-Unis, le National Institute for Occupational Safety and Health poursuit des travaux multidisciplinaires qui ont pour objectif de trouver des moyens pour aider les travailleurs à appliquer avec plus de rigueur les principes déjà établis en santé et sécurité au travail, tout en tenant compte des particularités liées à l'exposition aux nanomatériaux²¹⁸. Certaines entreprises sont aussi très actives dans l'élaboration de lignes de conduite afin de réduire au minimum les effets indésirables des activités nanotechnologiques. Par exemple, la compagnie Luna Innovations en Virginie a mis en œuvre en 2005 un programme de management appelé NanoSAFE. Ce programme comprend cinq éléments²¹⁹ :

- s'assurer de la bonne santé des travailleurs de façon régulière afin de détecter rapidement des effets potentiellement néfastes des activités occupationnelles ;
- mettre en place des mécanismes permettant de vérifier la sécurité des lieux de travail (notamment en installant des capteurs pouvant mesurer la présence et le taux de nanoparticules, mais également des mesures de sécurité primaires comme de porter des gants longs ou des vêtements dont les manches recouvrent adéquatement les poignets afin d'éviter toute exposition de la peau) ;

215. *Ibid.*

216. SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, op. cit. ; *Canadian Biotechnology Initiatives Addressing Developing Countries Issues*, Final Report, David CAMPBELL et Grégoire CÔTÉ, National Research Council Canada, Research Program Support Office, mars 2005 [en ligne] http://www.science-metrix.com/pdf/SM_2005_001_NRC_Biotechnology_Developing_Countries.pdf ; Lorraine SHEREMETA, « Nanotechnology and the Ethical Conduct of Research Involving Human Subjects », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004 [en ligne] http://www.law.ualberta.ca/centres/hli/pdfs/hlr/v12_3/12-3-11%20Sheremeta.pdf ; Mark ROSEMAN, op. cit. ; Lorraine SHEREMETA, « Nanoscience and Nanotechnology: The Ethical, Environmental, Economic, Legal and Social Issues (NE³LS) – An Overview of NE³LS Research in Canada », Paper prepared for the Office of the National Science Advisor, 13 septembre 2005 ; OFFICE OF THE NATIONAL SCIENCE ADVISER (Canada), *Assessment of Canadian Research Strengths in Nanotechnology*, Report of the International Scientific Review Panel, novembre 2005 [en ligne, disponible sur demande] http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html.

217. Les informations contenues dans ce paragraphe ont été validées par M. Hans Yu de Santé Canada lors de sa présentation dans le cadre du Nanoforum 2006.

218. NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH – NIOSH (États-Unis), *Position Statement on Nanotechnology: Advancing Research on Occupational Health Implications and Applications* (non daté) [en ligne] <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/position.html>.

219. Josh CABLE, « A Best Practices Approach to Minimizing EHS Risk in Nanotechnology Manufacturing », *Occupational Hazards*, 6 octobre 2005 [en ligne] http://www.occupationalhazards.com/safety_zones/42/article.php?id=14129.

- effectuer des études toxicologiques ;
- mener des études sur les impacts environnementaux possibles ;
- assurer une gestion stratégique des lieux de travail et des produits afin, notamment, d'éviter des rejets de nanoparticules dans l'environnement.

La protection de la population

La Commission rappelle que la protection de la population est une valeur fondamentale à respecter lors de la mise en marché de n'importe quel produit de consommation issu des nanotechnologies. Elle y associe également la responsabilité des entreprises à l'égard des produits qu'elles commercialisent, le souci de ne nuire d'aucune façon, ainsi que la transparence du processus décisionnel.

Comme l'observent eux-mêmes les promoteurs, l'acceptation par la population des nouveaux produits issus des nanotechnologies constitue un préalable à la croissance du secteur ; la reconnaissance de ce fait est la résultante d'expériences durement acquises dans d'autres domaines technologiques émergents dont les organismes génétiquement modifiés constituent l'exemple par excellence²²⁰. Or, l'acceptation des produits et des services issus des nanotechnologies ne pourra se faire que si le public a confiance dans les produits et services qui lui sont offerts et dans les entreprises qui les développent. Deux facteurs joueront un rôle dans la détermination du niveau de confiance de la population : la conviction que l'innocuité des produits et services mis en marché a bel et bien été démontrée – autrement dit, l'assurance que la population est adéquatement protégée contre les effets néfastes possibles – et la transparence des autorités (gouvernementales, industrielles et autres) dans le processus de gouvernance. Ce dernier facteur sera abordé un peu plus loin.

L'assurance de l'innocuité des produits issus des nanotechnologies est une préoccupation majeure dans la réflexion de la Commission. Ainsi qu'il a été mentionné précédemment, ces produits sont de plus en plus nombreux et certains sont déjà proposés sur le marché comme produits de consommation courante ; il s'agit de certains cosmétiques (fonds de teint, rouges à lèvres, crèmes solaires, antirides, etc.) ou de divers produits pour la santé (suppléments vitaminiques, produits minceur), de produits d'entretien ou de nettoyage (en aérosol ou non) et de quelques produits alimentaires (poudres pour laits fouettés, huiles, etc.)²²¹. Or, il est impossible de savoir à l'heure actuelle si ces produits peuvent être nocifs à l'usage, parce qu'il existe peu de résultats de recherche concernant leurs effets sur les animaux, l'environnement ou les êtres humains. De plus, des experts s'inquiètent du peu de moyens dont disposent les autorités sanitaires pour contrôler les produits mis en marché²²². Enfin, même si ces autorités avaient les moyens et le personnel nécessaires, il n'en faudrait pas moins que des normes d'acceptation soient édictées, ce qui n'est pas encore le cas. La Royal Society a proposé à cet effet que l'industrie rende publiques les méthodes utilisées afin de tester la sécurité des produits issus des nanotechnologies, en particulier ceux qui contiennent des particules libres ; ainsi qu'il a été signalé au premier chapitre, ces particules seraient celles qui pourraient poser le plus de problèmes en ce qui a trait à la santé des individus ou à l'environnement²²³.

À titre d'exemple, mentionnons qu'un premier cas de rappel d'un produit comportant possiblement²²⁴ des nanoparticules – le *Magic Nano*, un produit nettoyant pour salles de bain – a eu lieu à la fin de mars 2006 en Allemagne, après que 77 personnes eurent rapporté des problèmes respiratoires importants qui ont persisté pendant près de 18 heures²²⁵. Quelques semaines après ce rappel, le Federal Institute for Risk Assessment allemand laissait savoir que le produit en question ne comportait

220. John BALDUS *et al.*, « Getting Nanotechnology Right the First Time », *Issues in Science and Technology*, vol XXI, n° 4, été 2005, p. 67 [en ligne] <http://www.issues.org/21.4/balbus.html>.

221. Voir la liste de nombreux produits commercialisés présentée par le WOODROW WILSON CENTER FOR SCHOLARS, *op. cit.*, sur le site <http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>.

222. J. Clarence DAVIES, *op. cit.*, p. 10.

223. THE ROYAL SOCIETY (Royaume-Uni), « Industry should disclose safety testing methods », Communiqué de presse, 4 mai 2006 [en ligne] <http://www.royalsoc.ac.uk/news.asp?year=&id=4639>.

224. Car il faut considérer que certains produits qui s'annoncent « nano » ne le sont pas nécessairement et que l'appellation peut constituer un élément de marketing pour certains.

225. Rick WEISS, « Nanotech Product Recalled in Germany », *Washington Post*, 6 avril 2006, p. A02 [en ligne] <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/04/05/AR2006040502149.html>.

aucune particule ultrafine* et qu'en fait le terme « nano » avait pour but d'attirer l'attention sur le film très mince que le produit laisse sur les surfaces vaporisées²²⁶. La situation n'en demeure pas moins préoccupante. Tout comme le risque lié à l'utilisation de produits nouveaux (issus des nanotechnologies ou autres), la possibilité qu'adviennent des problèmes de santé ou environnementaux ne peut être écartée; sur le plan éthique, de tels risques doivent être réduits au minimum, si ce n'est totalement évités, notamment au moyen de tests relatifs à la sécurité d'un produit avant sa mise en marché.

Enfin, il faut également se préoccuper des effets d'une utilisation à long terme de tels produits ou applications, en particulier pour le secteur des cosmétiques; ce secteur n'est pas régi de la même façon que le domaine thérapeutique, les recherches effectuées le sont à petite échelle et les résultats sont rarement disponibles. Est-ce que les nanoparticules qui entrent dans la composition de crèmes de toutes sortes pourraient causer des problèmes de santé à long terme? Pourraient-elles créer des interactions dommageables dans l'organisme? Il est encore trop tôt pour avoir des réponses à de telles questions, et pourtant des produits cosmétiques à base de nanoparticules sont déjà commercialisés.

Comme pour les organismes génétiquement modifiés²²⁷, la Commission réitère l'importance pour les agences sanitaires et les entreprises de procéder aux études toxicologiques nécessaires avant de mettre en marché des produits utilisant des nanotechnologies et d'assurer une veille sur les effets que pourraient avoir les nanotechnologies sur la santé humaine à plus longue échéance. De telles études devraient être menées en priorité sur les produits qui sont déjà sur le marché.

Recommandation n° 2

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, en collaboration avec le ministre de la Santé et des Services sociaux, intervienne auprès du gouvernement fédéral afin que ses agences de contrôle en matière de santé et d'environnement mettent en place les mécanismes nécessaires à une évaluation de la toxicité des processus et des produits issus des nanotechnologies avant d'en autoriser la commercialisation.

Le développement technologique comme facteur d'enrichissement collectif et d'amélioration de la qualité de vie des citoyens est certes une valeur importante dans nos sociétés, auquel le développement des nanotechnologies semble pouvoir contribuer; mais en aucun cas il ne peut se faire au détriment de la santé et de la sécurité des travailleurs ou des citoyens, la protection de la vie constituant de toute évidence la valeur prioritaire. **La Commission est d'avis que des mesures de prévention adéquates et une bonne connaissance du cycle de vie des produits issus des nanotechnologies contribueront à protéger la santé et la sécurité humaines et participeront au développement responsable de ce secteur d'activité.**

Les applications dans le domaine de la santé

Les propriétés particulières des nanotechnologies amènent les scientifiques à examiner de nouvelles approches diagnostiques et thérapeutiques qui pourraient être prometteuses. La réflexion de la Commission l'a conduite à s'intéresser d'abord aux questions touchant l'éthique de la recherche biomédicale, pour ensuite étudier celles des développements concernant l'exercice du diagnostic médical et les applications thérapeutiques liées à l'exploitation des nanotechnologies. Les nanotechnologies pourraient également jouer un rôle important dans l'optimisation des performances humaines, un thème généralement associé au domaine médical. Cependant, comme une telle intervention est intimement liée à la représentation symbolique de l'être humain, la Commission a choisi d'aborder le sujet de façon distincte un peu plus loin.

226. FEDERAL INSTITUTE FOR RISK ASSESSMENT (Allemagne), « Nanoparticles were not the cause of health problems triggered by sealing sprays ! », Communiqué, 26 mai 2006 [en ligne] <http://www.bfr.bund.de/cms5w/sixcms/detail.php/7842>.

227. Voir le chapitre 4 de l'avis *Pour une gestion éthique des OGM* [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca>.

L'éthique de la recherche biomédicale

La recherche biomédicale évolue depuis de nombreuses années dans un cadre éthique défini. Au Québec, les instruments institutionnels suivants balisent la recherche universitaire : l'*Énoncé de politique des trois Conseils*²²⁸ subventionnaires fédéraux (EPTC), auquel ont adhéré les organismes subventionnaires québécois ; s'y ajoutent le *Plan d'action ministériel en éthique de la recherche et en intégrité scientifique*²²⁹ auquel est soumise la recherche effectuée dans les établissements du réseau de la santé et des services sociaux, les articles 20, 21, 22, 24 et 25 du *Code civil*²³⁰ qui portent sur l'expérimentation humaine, la *Loi sur les aliments et drogues*²³¹ et le règlement du même nom²³² qui régissent les essais de médicaments, ainsi que *Les bonnes pratiques cliniques : directives consolidées*²³³ de Santé Canada. En outre, le Fonds de la recherche en santé du Québec (FRSQ), qui finance la recherche publique dans le domaine de la santé au Québec, s'est doté d'un guide d'éthique²³⁴. Les recherches publiques en nanotechnologies qui incluent des expérimentations sur l'être humain sont aussi soumises à l'ensemble de ces règles. Toutefois, la recherche biomédicale privée est uniquement soumise, pour sa part, aux *Bonnes pratiques cliniques* et dans certaines circonstances à l'article 21 du Code civil.

Parce que les nanotechnologies sont vues comme des technologies habilitantes* (*enabling technology*), le questionnement éthique soulevé par la recherche sur les nanotechnologies appliquées à la santé devrait être le même que pour d'autres technologies biomédicales émergentes. Ce seront notamment des questions relatives à la

confidentialité des renseignements personnels, au respect des personnes, au consentement éclairé, à la finalité de la recherche, à la valeur scientifique et sociale de la recherche, etc. Ces préoccupations sont abondamment documentées et la Commission en a traité dans son avis sur les enjeux éthiques des banques d'information génétique²³⁵.

Les contraintes sur l'éthique de la recherche biomédicale que la Commission a constatées en 2003 ont évolué. Certaines sont en voie de disparaître, du moins en partie : c'est le cas du financement et de la formation des comités d'éthique de la recherche en milieu hospitalier. Cependant, plusieurs éléments n'ont pas encore été réglés, comme la difficulté de faire un suivi assidu des protocoles de recherche, l'évaluation des protocoles multicentres où s'instaure de plus en plus de compétitivité entre divers centres candidats, de même que l'impossibilité d'évaluer la pertinence ou la portée sociale de certaines recherches. La Commission postule que ces questions se poseront également au regard du développement des nanotechnologies dans le domaine de la santé.

Considérant l'avenir prometteur des nanobiotechnologies, il importe d'appliquer rigoureusement les principes de l'éthique de la recherche afin de protéger les sujets de recherche qui participent volontairement à l'avancement des connaissances. Les comités d'éthique de la recherche étant à l'avant-plan dans la protection des sujets humains, les membres de ces comités doivent être sensibilisés aux questions qui se poseront dans le domaine de la recherche en nanobiotechnologies et outillés pour y réagir adéquatement.

228. INSTITUTS DE RECHERCHE EN SANTÉ DU CANADA, CONSEIL DE RECHERCHES EN SCIENCES NATURELLES ET EN GÉNIE DU CANADA, CONSEIL DE RECHERCHES EN SCIENCES HUMAINES DU CANADA, *Énoncé de politique des trois Conseils. Éthique de la recherche avec des êtres humains*, août 1998, modifié en 2000, 2002 et 2005 [en ligne] http://www.pre.ethics.gc.ca/francais/pdf/TCPs%20octobre%202005_F.pdf.

229. MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX (Québec), *Plan d'action ministériel en éthique de la recherche et en intégrité scientifique*, 1998 [en ligne] <http://ethique.msss.gouv.qc.ca/site/download.php?id=1081608,5,1>. À noter que ce document est actuellement en révision.

230. GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Code civil du Québec* (L.R.Q., c. C-1991) [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/ccq/20060525/tout.html>.

231. L.R., 1985, ch. F-27 [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/>.

232. C.R.C., ch. 870 [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/C.R.C.-ch.870/texte.html>.

233. SANTÉ CANADA, *Ligne directrice à l'intention de l'industrie. Les bonnes pratiques cliniques : directives consolidées*, Direction générale des produits de santé et des aliments, 1997 [en ligne] http://www.hc-sc.gc.ca/dhp-mps/alt_formats/hpfb-dgpsa/pdf/prodpharma/e6_f.pdf.

234. FONDS DE LA RECHERCHE EN SANTÉ DU QUÉBEC – FRSQ, *Guide d'éthique de la recherche et d'intégrité scientifique*, Standards en éthique de la recherche et en intégrité scientifique du FRSQ, 2^e édition, août 2003 [en ligne] <http://www.frsq.gouv.qc.ca/fr/ethique/ethique.shtml>.

235. COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique : pour un encadrement démocratique et responsable*, Gouvernement du Québec, 2003 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/AvisBanquesGen.pdf>. Voir en particulier le chapitre 2 portant sur l'environnement des banques d'information génétique et le chapitre 3 sur la gouvernance des enjeux.

Recommandation n° 3

La Commission recommande :

que le ministre de la Santé et des Services sociaux s'assure que les comités d'éthique de la recherche seront adéquatement outillés et soutenus dans leur évaluation de protocoles de recherche portant sur l'utilisation dans le domaine médical des matériaux et procédés issus des nanotechnologies.

Il est difficile de prévoir quelles avenues empruntera le développement des nanotechnologies. Il faut tout de même, dès à présent, engager la discussion sur ses finalités, ses conséquences avérées ou hypothétiques, et trouver en concertation avec tous les acteurs concernés la meilleure façon de protéger les sujets de recherche, tout en évitant de nuire aux activités de recherche et de développement.

Diagnostics et applications thérapeutiques

Ainsi qu'il a été vu au premier chapitre, les espoirs suscités par le développement des nanotechnologies dans le domaine du diagnostic et de la thérapie sont nombreux et les bénéfices escomptés sont importants. Bien que les préoccupations éthiques posées par ces nouvelles technologies ne soient pas toutes exclusives à l'apport des nanotechnologies dans le domaine de la médecine, la Commission estime important de les signaler pour qu'il soit possible de les prendre en considération dans les décisions à venir en la matière.

Dans le domaine du diagnostic, des innovations issues des nanotechnologies, comme les laboratoires sur puce ou les techniques d'imagerie magnétique, pourraient permettre d'importantes économies de temps dans l'établissement d'un diagnostic et la mise en place plus rapide du traitement approprié. En ce qui a trait aux applications thérapeutiques issues des nanotechnologies, les principales concernent actuellement la vectorisation et l'activation de médicaments, qui permettraient de maximiser le potentiel thérapeutique tout en diminuant les effets dommageables qu'ils pourraient avoir sur les tissus sains environnants, de même que la restauration ou le remplacement d'organes ou de fonctions, y compris l'ouïe, la vue ou la motricité.

La question de l'interférence des nanoparticules avec le fonctionnement du corps humain (ou avec l'environnement) retient aussi l'attention de la Commission. Lorsqu'une structure est plus petite que 100 nanomètres, elle entre en réaction avec les protéines de l'organisme, ce qui pourrait provoquer des effets imprévus et encore méconnus²³⁶. D'autres questions se posent également en ce qui a trait à l'élimination des nanomédicaments par le corps humain : quels en seront les effets potentiels sur la faune et la flore ? Cette question est soulevée dans la foulée d'informations relatives au fait que des études ont récemment démontré que les anovulants se retrouvent dans les eaux traitées et qu'ils affecteraient l'appareil reproducteur de certains poissons, les rendant même hermaphrodites²³⁷ ou allant jusqu'à provoquer un changement de sexe chez les mâles²³⁸. De tels cas devront être explorés plus à fond par la recherche et démontrent la nécessité que des liens soient tissés entre différentes disciplines, comme l'environnement et la santé dans le cas présent.

Enfin, en raison de la capacité qu'ont les nanoparticules de traverser la barrière hématoencéphalique, leur utilisation présente un intérêt majeur dans le traitement des maladies d'origine neurologique, comme la maladie de Parkinson, la sclérose en plaques ou la maladie d'Alzheimer. Mais elle constitue également une source de préoccupation. La barrière hématoencéphalique est l'ultime rempart du cerveau contre les agressions extérieures de certains microorganismes. Or, le fait d'avoir trouvé de nouvelles façons de déjouer les défenses naturelles du cerveau, grâce à des technologies qui sont, de surcroît, encore peu maîtrisées et invisibles à l'œil nu, pourrait bien avoir des conséquences déplorables si la R-D nanotechnologique n'est pas suffisamment balisée. L'utilisation des nanotechnologies dans le domaine neurologique à des fins thérapeutiques, mais possiblement aussi à des fins d'amélioration du fonctionnement du cerveau, est intimement associée au domaine des neurosciences. La Commission compte entreprendre la préparation d'un avis dans ce domaine en 2007 ; le questionnement éthique lié aux préoccupations qui découlent de la diversité des utilisations possibles en la matière fera partie de sa réflexion.

236. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 20.

237. William COCKE, « Male Fish Producing Eggs in Potomac River », *National Geographic News*, 3 novembre 2004 [en ligne] http://news.nationalgeographic.com/news/2004/11/1103_041103_potomac_fish.html.

238. Melanie Y. GROSS-SOROKIN, Stephen D. ROAST et Geoffrey C. BRIGHTY, « Assessment of Feminization of Male Fish in English Rivers by the Environment Agency of England and Wales », *Environmental Health Perspective*, vol. 114, n° S-1, avril 2006 [en ligne] <http://www.ehponline.org/members/2005/8068/8068.pdf>.

L'état actuel des connaissances ne permet guère à la Commission d'extrapoler sur l'impact économique potentiel de l'introduction de nouvelles méthodes de diagnostic et de traitement comportant des nanotechnologies. Vraisemblablement, certaines de ces nouvelles technologies permettraient des économies pour le système de santé, alors que d'autres représenteraient des coûts prohibitifs. Cette question renvoie au problème beaucoup plus large de l'allocation des ressources et de la gouvernance, où d'importants choix qui concernent la société devront être faits.

La préoccupation de l'accessibilité économique dans un système de santé public s'applique à toutes les activités de la nanomédecine. Qui aura accès à ces nouvelles technologies? Quelles maladies seront privilégiées et qui en bénéficiera? Ces questions, tant sur l'accès aux soins que sur le type de couverture médicale que souhaite et peut s'offrir la collectivité, méritent d'être débattues sur la place publique. Cela aurait notamment le mérite de sensibiliser la population aux enjeux éthiques et sociaux que soulèvent le développement de nouvelles technologies et la convergence de certaines disciplines scientifiques – comme les nanotechnologies, la biologie, les sciences de l'information et les sciences cognitives (les *NBIC*)²³⁹ – dans l'offre de soins de santé.

Dans ce même contexte, la Commission s'interroge sur une offre de diagnostic (grâce aux nanotechnologies ou non) qui ne serait pas assortie d'une offre thérapeutique appropriée – par exemple un test en vue de diagnostiquer une maladie donnée pour laquelle il n'existe encore aucun traitement préventif ou curatif. Cette possibilité existe déjà et n'est pas sans rappeler les réflexions entourant le diagnostic génétique, abordé dans un précédent avis, notamment en ce qui concerne le droit de savoir ou de ne pas savoir²⁴⁰. La Commission y faisait également part de sa crainte de voir une sorte d'eugénisme individuel prendre place dans les pratiques de procréation; par exemple, advenant le diagnostic prénatal positif d'une maladie génétique qui *surviendra peut-être* (test de susceptibilité), mais pour laquelle il n'existe aucun traitement à l'heure actuelle, les seuls choix médicaux disponibles pour les futurs parents sont

le suivi médical de l'enfant à naître ou l'interruption volontaire de grossesse. Les nanotechnologies pourraient donc participer à l'amplification d'un dilemme auquel des parents sont déjà confrontés et qui n'a pas encore été débattu au sein de la société.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

La Commission insiste sur l'importance de se laisser guider par la précaution dans le processus de création et de mise au point de médicaments et de thérapies à composants nanotechnologiques. Une telle approche incite à poursuivre la recherche et à documenter les effets potentiellement positifs et négatifs des applications nanotechnologiques dans le domaine des soins de santé afin de mieux évaluer les retombées pour les malades et pour le fonctionnement du système de santé en général.

En matière d'environnement

La Commission inscrit sa réflexion sur les enjeux éthiques environnementaux posés par les nanotechnologies dans la perspective du développement durable, y compris l'approche cycle de vie et le principe de précaution, qu'elle considère comme des éléments de gestion essentiels. La responsabilité individuelle et collective à l'égard de l'environnement et des générations futures ainsi que la qualité de vie font partie des valeurs qui ont guidé la Commission dans ses discussions.

La documentation consultée indique que les nanotechnologies pourraient avoir de nombreux impacts positifs sur l'environnement; elles se présenteraient ainsi en appui au développement durable. Certaines applications prévues auront pour objectif de restaurer des habitats et des écosystèmes non viables (proaction); d'autres chercheront plutôt à protéger l'environnement des effets potentiellement néfastes de l'activité humaine (protection, prévention). Ces bienfaits potentiels des nanotechnologies doivent être encouragés; toutefois, l'innocuité des nanotechnologies reste à démontrer et les effets potentiellement indésirables de celles-ci ne peuvent être balayés du revers de la main.

La plus grande source d'exposition environnementale appréhendée concerne, à court terme, l'utilisation de

239. Lorraine SHEREMETA, « Synthesis Paper. Nanotechnology: the NE³LS Issues », Prepared for Health Canada, 18 juillet 2005, *op. cit.*, p. 6.

240. COMMISSION DE L'ETHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique...* *op. cit.*, p. 48.

nanoparticules dans l'assainissement des eaux ou des sols contaminés, en raison de l'impact que pourrait avoir la grande réactivité des nanoparticules sur les plantes, les animaux, les microorganismes et les écosystèmes²⁴¹. Cette question est cruciale, car «les expériences récentes en santé humaine et environnementale suggèrent que, pour un système biologique donné, la dimension est un facteur important dans la détermination de la dangerosité d'une substance. L'inhalation, l'absorption, la diffusion, la transmission à travers les barrières naturelles sont toutes des vecteurs de maladies et de méfaits biologiques qui dépendent de la taille des particules. L'introduction dans notre environnement de grandes quantités de nanoparticules [de synthèse], alors que leurs effets biologiques et de dispersion sont mal connus, devrait nous préoccuper²⁴².» Les données cumulées jusqu'à maintenant ne permettent pas de tracer un portrait fiable de la situation. Des études préliminaires ont cependant démontré que certains nanomatériaux peuvent endommager les organes et les tissus d'organismes vivants. En particulier, des préoccupations sont soulevées quant à la toxicité des fullerènes (C₆₀)²⁴³. Un rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques mentionne également que, bien qu'elle soit un facteur important, «la taille n'est qu'un aspect du problème pour les toxicologues. Par exemple, les effets biologiques du carbone diffèrent selon qu'il est sous forme de fullerènes, de nanotubes ou de graphite. D'autre part, les résultats dépendent aussi du processus de fabrication à cause des impuretés éventuelles²⁴⁴.»

La Royal Society estime qu'il est possible que dans les cas d'assainissement tout impact négatif sur les écosystèmes sera contrebalancé par les bénéfices accompagnant le nettoyage des eaux et des sols contaminés, bien que cette assertion doive être validée par des recherches appropriées²⁴⁵. Le National Nanotechnology Advisory

Panel américain rappelle pour sa part que plusieurs nouvelles technologies comportent des risques connus qui sont contrôlés adéquatement afin d'en maximiser les bénéfices – par exemple, l'essence, l'électricité ou les rayons X²⁴⁶; il pourrait en être de même pour plusieurs produits et procédés issus des nanotechnologies.

Dans le cadre du présent avis, **la Commission ne peut qu'insister sur l'importance de multiplier les recherches sur les conséquences potentielles des nanotechnologies afin de déterminer quelles substances pourraient être dommageables. Cette proposition commande un engagement de la part des chercheurs, des industriels et des organismes gouvernementaux.** Faire autrement serait irresponsable et risquerait même de mettre en péril le développement des produits issus des nanotechnologies et leur acceptation par la population; des spécialistes avancent même que «si le danger est reconnu une fois que l'utilisation du produit s'est répandue, les conséquences iront au-delà de la souffrance humaine et des dommages environnementaux pour inclure de longues batailles réglementaires et juridiques, des efforts de nettoyage coûteux et des débats publics onéreux²⁴⁷». De toute évidence, et quel que soit le point de vue adopté – éthique, social ou économique –, une telle situation doit être évitée.

Si certaines réponses peuvent être fournies à partir d'études en laboratoire, d'autres devront nécessairement provenir d'analyses *in situ* – ce sera le cas par exemple pour des effets des nanotechnologies qui sont inattendus (non prévus) ou qui ne se produiront qu'à long terme. Il est donc possible que certains produits aient des effets dommageables sur l'environnement par leur accumulation dans divers systèmes régulateurs de l'environnement. Les changements climatiques sont un bon exemple des effets à long terme de l'activité humaine sur son milieu, et des leçons doivent en être tirées.

241. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, «Dwarfing the Social? Nanotechnology Lessons from the Biotechnology Front», *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004, p. 29 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/cgi/reprint/24/1/28>.

242. (Traduction libre) Christopher J. PRESTON, *op. cit.*, section 4.1.

243. Tanya SHEETZ *et al.*, «Nanotechnology: Awareness and Societal Concerns», *Technology in Society*, 27 août 2005, p. 334.

244. Jean-Louis PAUTRAT, «Comment définir les nanosciences?», dans OFFICE PARLEMENTAIRE..., *op. cit.*, p. 83.

245. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 46-47.

246. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *op. cit.*, p. 35.

247. (Traduction libre) John BALDUS *et al.*, *op. cit.*, p. 65.

Recommandation n° 4

La Commission recommande :

- que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, en concertation avec le ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et les divers acteurs concernés, mette en place un système de veille relatif aux effets potentiels des nanotechnologies sur l'environnement, lorsque ces effets ne peuvent être calculés et pris en compte avant la commercialisation de produits issus des nanotechnologies ;
- qu'une procédure soit élaborée afin d'assurer le retrait rapide des produits mis en cause advenant le constat d'effets délétères sur l'environnement.

La mise en place d'une telle procédure s'avère pressante, puisqu'il existe très peu de données sur la façon de se départir des produits fabriqués avec des nanoparticules, qu'une forte incertitude subsiste en ce qui a trait à leur innocuité et que nombre de produits sont déjà commercialisés²⁴⁸.

La question des coûts liés à l'introduction des nanotechnologies doit également être soulevée et des analyses coûts/efficacité devront être entreprises. Afin d'illustrer ce propos, la Commission attire l'attention sur un exemple ayant démontré que l'implantation d'un nouveau système d'éclairage des rues utilisant la technologie DEL (diode électroluminescente; en anglais LED/ *light-emitting diode*) nécessiterait des investissements initiaux importants, mais que son utilisation à grande échelle pourrait faire diminuer de 50 % d'ici à 2025 les coûts associés à l'éclairage des villes²⁴⁹. C'est dans des dilemmes comme celui-ci que les notions de cycle de vie, de préservation de l'environnement, de prise en compte des besoins des générations futures prennent tout leur sens aux fins d'une décision à caractère éthique.

Enfin, de nombreuses questions restent en suspens et devront être débattues. Comment assurer le développement économique de la société québécoise tout en préservant la qualité de son environnement? Comment prévoir les besoins des générations futures? Et

puisque l'activité humaine des pays industrialisés a des répercussions à l'échelle de la planète, comment assurer un développement qui tende vers une équité pour tous? C'est à l'aune des réponses à ces questions que se mesurera la sagesse des décideurs politiques et institutionnels.

En matière de sécurité

Depuis l'attaque terroriste du 11 septembre 2001 aux États-Unis, les questions de sécurité et de défense militaire ont pris une dimension accrue qui se répercute au Canada comme ailleurs dans le monde. Assurer la protection du territoire et des populations devient un enjeu majeur des gouvernements, à la fois sur le plan militaire et sur celui de la sécurité publique, et amplifie la vague d'intégration technologique amorcée à la fin des années 1980. Dans un cas comme dans l'autre, les nanotechnologies présentent un potentiel d'applications d'une grande diversité en matière de sécurité. Cependant, comme pour tout autre développement fondé sur l'exploitation des nanotechnologies, des questions doivent être soulevées sur le plan éthique afin de veiller à ce que les objectifs visés et les applications mises au point dans un contexte de sécurité n'aient pas de répercussions indésirables, sinon néfastes, sur la société et sur ses membres.

Dans le domaine militaire

La Commission aborde cette problématique de façon très préliminaire. En ce qui a trait au domaine militaire, elle estime en effet que le peu d'informations dont elle dispose sur le sujet à l'échelle canadienne et québécoise relativement aux objectifs de recherche-développement et au financement de la recherche dans ce domaine ne lui permet pas d'en traiter de façon plus approfondie. C'est donc en grande partie sur une information relative à la situation américaine que la Commission donne ci-dessous un aperçu des utilisations possibles des nanotechnologies et des enjeux qui se posent, de façon à amorcer un début de réflexion éthique en la matière.

248. SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, op. cit., p. 2.

249. ENVIRONMENTAL SERVICES ASSOCIATION OF ALBERTA (Canada) – BERT, op. cit., p. 21 ; exemple fourni par Terry McIntyre d'Environnement Canada.

Quelques exemples d'applications « nanomilitaires »²⁵⁰

Les efforts de recherche nanomilitaire tirent profit de la combinaison et de la convergence des propriétés des nanomatériaux, des performances de la nanoélectronique et des possibilités qu'offrent les nanobiotechnologies afin d'atteindre des objectifs ambitieux, dont :

- **Assurer la protection et la survie des soldats**, notamment par la conception d'une combinaison de combat « high-tech ». Les recherches visent à combiner les possibilités offertes par les nanotechnologies afin de fabriquer une tenue légère et confortable, qui possède les caractéristiques suivantes : change de couleur comme le fait un caméléon pour tenir compte de l'environnement ; peut protéger contre les projectiles et les agents chimiques et biologiques ; devient rigide sur demande pour agir comme une compresse ou une attelle en cas de blessure ; est équipée de capteurs pour vérifier les signes vitaux du soldat et y réagir par l'injection de médicaments au besoin ; est dotée de moyens de communication instantanée à distance et d'un exosquelette pour aider au transport de lourdes charges. Le soldat lui-même pourrait éventuellement être pourvu d'implants rétiniens pour accéder à une information électronique, d'implants cochléaires pour recevoir des messages ou améliorer son ouïe, d'implants neuronaux ou musculaires pour améliorer ses performances mentales ou physiques²⁵¹. Dans un premier temps, toutefois, et à court terme, une première étape serait de réduire de 60 à 20 kilos la charge que transporte un soldat.
- **Miser de plus en plus sur la robotisation et sur la communication à distance²⁵²** afin de remplacer les soldats ou de les assister dans des tâches dangereuses ou complexes, notamment sur le champ de bataille. Il peut être utile de rappeler qu'un robot n'a pas nécessairement une apparence humaine et que le terme désigne tout appareil, système ou dispositif capable de remplir certaines fonctions plus ou moins sophistiquées, soit en étant contrôlé à distance, soit de façon autonome grâce à une programmation électronique (comme les robots Spirit et Opportunity sur Mars). Selon le cas, les robots peuvent être destinés à l'attaque ou à la défense (chars d'assaut et autres engins du genre), au transport des munitions ou de lourdes charges, à la collecte d'informations, au déminage ou à la pose de bombes, à la détection des armes chimiques, biologiques et nucléaires, à la surveillance aérienne (les drones*) et électronique (comme les poussières électroniques communicantes mentionnées au chapitre 1), etc. La convergence des nanotechnologies et des technologies de l'information, particulièrement en ce qui a trait à l'intelligence artificielle, joue un rôle fondamental dans la mise au point de robots.
- **Développer la réalité virtuelle et l'intelligence artificielle**, notamment à des fins de formation et d'entraînement des forces militaires, de contrôle de forces robotisées et d'utilisation de systèmes de gestion de combat et de planification stratégique pour aider à la prise de décision ou permettre une prise de décision sans intervention humaine.

250. Le contenu de la présente section s'appuie sur l'information contenue dans les sites des organismes militaires américains, notamment celui de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) http://www.darpa.mil/body/off_programs.html, de la DMEA (Defense MicroElectronics Activity) <http://www.dmea.osd.mil/home.html> et de l'ISN (Institute for Soldier Nanotechnology) <http://web.mit.edu/ISN/>. Les textes suivants ont également été consultés : Jürgen ALTMANN et Mark Avrum GUBRUD, « Military, Arms Control, and Security Aspects of Nanotechnology », dans D. Baird, A. Nordmann et J. Schummer (dir.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam, IOS Press, 2004 [en ligne] <http://cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/toc.html> ; Jürgen ALTMANN, « Military Uses of Nanotechnology : Perspectives and Concerns », *Security Dialogue*, vol. 35, n° 1, 2004 ; Alexander Huw ARNALL (pour Greenpeace), *op. cit.* ; ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, *From Genome to Atoms. The Big Down, Atomtech: Technologies Converging at the Nano-Scale*, Winnipeg, janvier 2000 [en ligne] <http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf> ; Joachim SCHUMMER, « Identifying Ethical Issues Amidst the Nano Hype », 2005 (pour l'UNESCO) ; NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (États-Unis), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington, Virginia, mars 2001 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/societalimpact/nanosi.pdf> ; CALIFORNIA COUNCIL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, *op. cit.* ; THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.* ; Lorraine SHEREMETA, « Nanoscience and Nanotechnology... », *op. cit.* ; Tim WEINER, « A New Model Army Soldier Rolls Closer to the Battlefield », *The New York Times*, 16 février 2005 [en ligne] <http://www.nytimes.com/2005/02/16/technology/16robots.html>.

251. Voir, entre autres, le site de l'Institute for Soldiers Nanotechnologies : <http://web.mit.edu/isn>.

252. Pour plus d'information sur le sujet, voir le projet américain Future Combat Systems (FCS) : <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fcs.htm>.

- **Améliorer les performances humaines**, qu'elles soient physiques ou mentales, afin de rendre le soldat plus apte à exercer son métier. Il pourra s'agir, par exemple, d'assurer une interface cérébrale homme-machine au moyen d'une puce implantée dans le cerveau, d'améliorer la vision et la communication par des implants rétiniens, de modifier la biochimie du corps humain pour compenser le manque de sommeil, de connecter des électrodes aux organes et nerfs sensoriels, nerfs moteurs ou muscles, ou à la région appropriée du cortex cérébral, par exemple, pour diminuer le temps de réaction des pilotes, etc.

Un aperçu des préoccupations éthiques

D'entrée de jeu, il importe de souligner que les applications militaires (qu'elles soient ou non liées aux nanotechnologies importe peu) soulèvent deux préoccupations majeures sur le plan de l'éthique : celle des finalités (elles ont un objectif avoué de défense, mais qu'en est-il d'une utilisation à des fins d'agression ? de répression ?) et celle du secret quant à ce qui se fait dans les laboratoires et aux résultats obtenus. Fort peu de chercheurs publient sur le sujet de la recherche militaire et sur les tenants et aboutissants de l'utilisation des nouvelles technologies par les militaires. Apparaît donc au premier plan toute la question de la transparence, qui pose un problème d'ordre éthique et qui suscite des interrogations sur le degré de confiance que la population peut ou doit accorder aux autorités décisionnelles dans le domaine militaire (gouvernements et officiers militaires). Un constat fondamental est aussi à faire : dans tout l'arsenal de recherches et de projets en cours, la mise au point de moyens d'attaque ou de défense (une distinction souvent ambiguë) contre l'ennemi constitue la raison d'être des diverses agences du domaine, et des sommes phénoménales y sont consacrées ; à première vue, toutefois, très peu d'efforts semblent porter sur les moyens d'éviter les conflits. C'est aussi une question d'éthique.

Cela dit, il est généralement admis que la recherche militaire peut être considérée comme une recherche « duale »²⁵³, c'est-à-dire qui présente un caractère de réciprocité entre les effets néfastes qu'elle comporte (mise au point de dispositifs d'attaque ou de défense et d'engins meurtriers

de toutes sortes, par exemple) et les effets bénéfiques qui peuvent en découler, à la fois en matière de protection (militaire ou civile) et de retombées technologiques pour la société (pour la santé ou pour l'environnement, par exemple). Comme il s'agit d'une recherche qui prend largement appui sur les connaissances fondamentales développées dans les laboratoires de recherche universitaires, et donc relativement accessibles, certains s'inquiètent des risques d'utilisations malveillantes par des individus ou des groupes qui pourraient survenir²⁵⁴.

Ainsi que le souligne Altmann, certaines applications militaires posent peu ou pas de problèmes (la mise au point de systèmes pour protéger la santé des soldats, par exemple), d'autres rejoignent des recherches déjà en cours dans la société civile (amélioration des ordinateurs, par exemple) et certaines pourraient également contribuer à la protection des civils et au désarmement (comme les capteurs pour détecter les agents biologiques)²⁵⁵.

Toutefois, d'autres avenues de recherche mettant à profit les nanotechnologies sont de nature à soulever des inquiétudes et des questionnements éthiques, particulièrement dans un contexte où subsistent de nombreuses inconnues relatives à l'encadrement éthique de la recherche. Mentionnons à titre d'exemples :

- la recherche sur l'amélioration des performances humaines (implants neurologiques et organiques, par exemple) ;
- la recherche sur la robotisation d'animaux (mammifères et insectes dotés d'électrodes à des fins de surveillance, de détection, mais aussi d'attaque en zone militaire, par exemple)²⁵⁶ ;
- la recherche sur l'intelligence artificielle ;
- la recherche sur les assembleurs moléculaires ;
- la recherche sur la mise au point de robots décisionnels (engins de surveillance et d'attaque) ;
- la recherche sur la miniaturisation des systèmes de surveillance et de transmission de l'information ;
- la recherche sur les armes nucléaires, bactériologiques et chimiques ;
- etc.

253. Michel CALLON et al., *Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies. Les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ?*, Grenoble, 22 septembre 2005, p. 11.

254. Voir THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL SOCIETY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, n° 28, p. 56.

255. Jürgen ALTMANN, *op. cit.*, p. 69.

256. *Ibid.*, p. 68.

Ce très bref survol démontre qu'un **questionnement doit se faire sur l'encadrement éthique de la recherche militaire et sur les enjeux éthiques qui sont associés au développement de nouvelles applications militaires issues des nanotechnologies**. Sur quelles bases éthiques, sur quelles valeurs sont prises les décisions dans le contexte militaire? Quels mécanismes de protection sont mis en place à l'égard de la société civile, de la santé et de l'environnement? Dans le développement de systèmes d'intelligence artificielle, notamment aux fins de l'autonomisation des engins de guerre, quels sont les mécanismes de contrôle prévus pour la protection des vies humaines (alliées ou ennemies)? Comment distinguer civils et militaires? Sur quelles bases éthiques s'effectue la recherche sur l'amélioration des performances humaines des soldats, et qu'en est-il du respect de leur dignité comme êtres humains? À quel point le développement de mécanismes de défense contre les armes atomiques, biologiques et chimiques peut-il être assimilé au développement de telles armes à des fins d'attaque contre l'ennemi? D'ailleurs, comment se définit l'ennemi dans un contexte où les conflits changent de nature²⁵⁷ et sont de plus en plus qualifiés d'« asymétriques », la technologie militaire devenant parfois obsolète? Une dernière interrogation, enfin : quelles sont les possibilités que l'État se serve des applications nanomilitaires contre ses propres citoyens dans certains contextes où une intervention militaire pourrait être requise?

Dans la société civile

La convergence des nanotechnologies et des technologies de l'information et de la communication dans la mise au point d'instruments de contrôle et de surveillance de plus en plus petits et de plus en plus performants constitue une source de préoccupation en matière d'éthique. Le développement des nanotechnologies en électronique et dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, d'une part, et les applications miniaturisées (et quasi invisibles), à haute performance et possiblement à coût modique qui en résulteront, d'autre

part, sont appelés à jouer un rôle majeur en matière de surveillance et de traçabilité (non seulement des produits, mais aussi des personnes) des populations civiles à des fins de sécurité. Cybersurveillance, vidéosurveillance, audiosurveillance, contrôles biométriques, détection de substances illicites, etc., ces technologies et bien d'autres – développées par l'armée pour espionner l'ennemi, mais qui pourraient se prêter à des usages civils contre le terrorisme (visant certains groupes dissidents, certaines communautés, par exemple) – soulèvent un important questionnement éthique.

Dans ses travaux relatifs à l'utilisation des données biométriques à des fins de sécurité²⁵⁸, la Commission aborde la problématique de la surveillance et s'interroge sur une intrusion possible de l'État et des organisations dans la vie privée des citoyens et des travailleurs. Différentes technologies sont certes mises à contribution à cet effet, mais les nanotechnologies, notamment dans le domaine de la nanoélectronique, augmentent et facilitent les possibilités actuelles et ouvrent la porte à la collecte et à l'utilisation d'informations sur les citoyens et les travailleurs à leur insu et sans aucune mesure avec les possibilités qui existaient jusqu'à présent. **La Commission est inquiète de constater que : « au nom de la sécurité, il apparaît aujourd'hui possible d'avoir des exigences moindres à l'égard de la protection des renseignements personnels et de leur confidentialité, du droit à la vie privée et des libertés civiles²⁵⁹ ».** Ce qui l'amène à se demander s'il faut vraiment qu'il en soit ainsi et s'il peut exister un équilibre entre la sécurité et les libertés individuelles et civiles.

Tout en intégrant les possibilités qu'ouvrent dorénavant les nanotechnologies en matière de contrôle et de surveillance, le sujet des enjeux éthiques liés à la sécurité civile sera donc repris de façon plus englobante dans un prochain avis de la Commission²⁶⁰. Cet avis permettra d'enrichir le présent questionnement et d'offrir des pistes de solution pour la protection des citoyens dans le respect des valeurs fondamentales d'une société démocratique et pluraliste.

257. Sur le sujet, voir entre autres Michael O'HANLON, *Technological Change and the Future of Warfare*, Washington, *Brookings Institution Press*, 2000 [en ligne] <http://brookings.nap.edu/books/0815764391/html/index.html>.

258. COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *L'utilisation des données biométriques à des fins de sécurité : questionnement sur les enjeux éthiques*, Document de réflexion, Gouvernement du Québec, 2005, p. 31-34 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/Biometrie-reflexion.pdf>.

259. *Ibid.*, p. 34.

260. La Commission prépare actuellement un avis sur les enjeux éthiques que soulève l'utilisation des données biométriques à des fins de sécurité ; les questions de vidéosurveillance et de cybersurveillance y sont abordées (cet avis sera publié en 2007). Entre-temps, il est possible de consulter son document de réflexion sur le sujet, *op. cit.*

Des préoccupations associées à la convergence des connaissances et des technologies

La convergence est l'un des sujets qui comportent le plus d'incertitudes, puisqu'elle incite à s'interroger sur ce qui *pourrait se faire* dans le domaine des nanotechnologies sans savoir ce qui *advientra* réellement. Il est apparu important à la Commission de s'y intéresser, car la convergence s'accompagne de nombreux défis éthiques et sociaux, notamment en ce qui concerne la représentation que l'être humain se fait de lui-même et de l'autre, mais également la représentation qu'il se fait de la nature. De nombreux penseurs s'interrogent sur l'impact de la technique et de l'artificiel sur les modes de vie et sur les représentations symboliques du vivant²⁶¹ – les nanotechnologies, en tant que produits de la convergence, n'échapperont pas à cette analyse²⁶². Au cœur de la réflexion éthique sur le sujet, la Commission retient particulièrement les valeurs suivantes : la dignité, l'intégrité de la personne, la responsabilité, la liberté, la solidarité, la qualité de vie, la justice et l'équité.

L'identité humaine dans un contexte d'optimisation des performances

La documentation consultée signale que les nanotechnologies pourraient contribuer à optimiser certaines caractéristiques physiologiques de l'être humain. Les développements pressentis n'ont pratiquement aucune limite et peuvent inclure les capacités cognitives²⁶³. Même si les visions extrêmes du potentiel d'application des nanotechnologies, portées entre autres par la philosophie transhumaniste – comme la possibilité de prolonger la vie de façon extraordinaire ou de séparer la conscience humaine du corps afin de la déplacer dans un ordinateur – semblent exagérées aux yeux d'un bon nombre de scientifiques, ces visions forment tout de

même l'arrière-plan des discussions sur les impacts des nanotechnologies pour les intellectuels qui se penchent sur ces questions²⁶⁴.

Certains développements – même s'il s'agit surtout d'interventions physiques dans un esprit de bénéfices thérapeutiques – soulèveront bon nombre d'interrogations fondamentales en ce qui concerne les représentations personnelles et sociales de l'identité humaine : ce que nous comprenons et considérons comme être *humain*, ce qui est jugé normal (ou *acceptable*) et ce qui ne l'est pas. De plus, la frontière peut être mouvante et ténue entre ce qui relève du domaine de la thérapie – guérir, soigner, rendre normal à nouveau – et ce qui appartient à l'optimisation des performances humaines – améliorer, rendre supérieur à la norme. Où se situe la différence entre une intervention en vue d'une amélioration et une intervention thérapeutique pour corriger un handicap acquis ou inné ? Sur quelles bases définir un handicap ?

Le rapport de la Royal Society souligne que des groupes de défense des droits des personnes handicapées s'opposent à l'optimisation des capacités humaines que les nanotechnologies pourraient éventuellement permettre. Ces groupes estiment qu'une telle possibilité pourrait conduire à la stigmatisation de ceux dont les capacités ne seraient pas améliorées²⁶⁵. La Royal Society émet l'opinion que le véritable enjeu éthique, pour la population handicapée, est l'allocation des ressources et l'accessibilité aux technologies. Des groupes consultés ont d'ailleurs fait valoir que les personnes handicapées préféreraient que l'argent soit alloué à des mesures pour contrer la discrimination, par exemple, plutôt qu'à l'élaboration de thérapeutiques spécifiques. Il a également été mentionné que la technologie médicale n'a pas lieu d'être si les personnes concernées n'y ont pas accès ou n'ont pas les moyens d'en bénéficier²⁶⁶.

261. Voir notamment les écrits de Hannah Arendt, Francis Fukuyama, Dominique Lecourt, Jeremy Rifkin, Mihail Roco sur le sujet.

262. Au Québec, le philosophe Jean-Pierre BÉLAND a dirigé un collectif intitulé *L'Homme biotech : humain ou posthumain ?* publié aux Presses de l'Université Laval en 2006. Par ailleurs, la sociologue Céline LAFONTAINE pilote un programme de recherche intitulé « Les nanotechnologies : de l'imaginaire scientifique aux transformations culturelles » [en ligne] <http://www.socio.umontreal.ca/personnel/documents/projetcrsh.pdf>. D'autres projets de recherche universitaire sont attendus dans les mois à venir.

263. À noter que la science n'a pas attendu le développement des nanotechnologies pour s'engager dans l'amélioration des performances humaines, qu'elles soient physiques ou mentales, comme en témoignent les substances utilisées pour améliorer la force et la résistance dans les sports d'élite ou la concentration dans les travaux intellectuels.

264. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 55.

265. *Ibid.*, p. 54.

266. *Ibid.*

La notion d'amélioration physique ou cognitive est un sujet qui suscite la controverse. Par exemple, des participants à la consultation britannique mentionnée ci-dessus ont avancé que toute amélioration d'un état de santé grâce à la thérapie génique est une forme d'eugénisme; que les améliorations génétiques des capacités de base, comme l'intelligence ou la grandeur, pourraient être acceptables seulement si elles étaient réparties de façon équitable entre les divers segments de la population. D'autres, en revanche, croient que, si l'amélioration des capacités individuelles par l'éducation et l'entraînement physique est acceptable, l'amélioration par d'autres moyens, comme la chirurgie esthétique ou la prise de drogues cognitives, est alors également acceptable²⁶⁷. Considéré dans cette optique, ce dilemme oppose l'autodétermination des personnes qui voudraient bénéficier d'améliorations physiques et cognitives²⁶⁸ et le respect des droits des personnes qui pourraient se sentir stigmatisées. Un tel glissement de la thérapie vers l'optimisation des performances pourrait engendrer des pressions importantes sur le système de soins de santé, notamment sur le régime d'assurance médicaments québécois.

La Commission met en garde contre l'attrait d'utiliser des médicaments, prescrits dans un cadre thérapeutique précis, pour améliorer des fonctions cognitives, ne serait-ce que ponctuellement. Il est déjà connu que des médicaments prescrits pour la narcolepsie ou pour le déficit d'attention peuvent agir également sur la capacité de concentration des individus; la tentation est grande de prendre ce genre de médicament afin d'être plus alerte lors d'une période de travail intense ou au moment d'une session d'examen²⁶⁹. La sécurité et l'efficacité des molécules sont testées pour des objectifs thérapeutiques

précis, pour des conditions médicales particulières, et non en vue de leur utilisation pour améliorer des capacités « normales ». De plus, ces molécules comportent généralement des effets secondaires qui ne sont jugés acceptables que parce que les patients qui les prennent n'ont pas d'autre choix²⁷⁰. Les possibilités que laissent entrevoir les nanotechnologies dans le domaine pharmacologique risquent d'amplifier ce phénomène.

Frontière subjective entre thérapie et optimisation des capacités humaines, double discours en ce qui concerne l'insertion de la population handicapée dans la vie « active », culte voué à la performance, équité dans la gamme de choix de santé offerts publiquement, vision de l'autonomie et de la responsabilité individuelle face à la collectivité, voilà où réside, selon la Commission, le questionnement éthique posé par l'utilisation des nanotechnologies à des fins d'optimisation des performances humaines.

En admettant que les promesses des nanotechnologies se réalisent, certaines de leurs applications renverront inévitablement à la signification même de l'expérience humaine, car elles auront le potentiel nécessaire pour modifier le rapport à soi de chaque être humain ainsi que ses représentations culturelles. Dans ce contexte, comment définir ce que c'est que d'être humain, de vivre comme un être humain? Qu'est-ce qui différencie l'être humain des autres organismes vivants? Où réside l'unicité de l'être humain? Jusqu'où l'être humain peut-il être transformé tout en restant humain? À quel point chacun pourra-t-il rester responsable et maître de ses actes? Jusqu'où l'être humain est-il prêt à aller dans la recherche de la perfection? Jusqu'où la société est-elle prête à laisser les individus aller dans cette avenue? L'im-

267. *Ibid.* Un débat similaire a lieu entre ceux qui se préoccupent de la prise de drogues par les athlètes (se fondant habituellement sur le principe que c'est une pratique déloyale ou que cela peut nuire à la santé) et ceux qui pensent que, s'il est acceptable d'améliorer ses capacités par l'exercice, ce devrait également l'être par la médication.

268. Voir aussi Patrick LIN et Fritz ALLHOFF, « Nanoethics and Human Enhancement: A Critical Evaluation of Recent Arguments », *Nanotechnology Perceptions*, vol. 2, n° 1, 27 mars 2006 [en ligne] <http://nanoethics.org/paper032706.html>; Éric de RUS, « Humanisme et transhumanisme : l'Homme en question », *L'Observatoire de la génétique*, n° 26, février-mars 2006 [en ligne] http://www.ircm.qc.ca/bioethique/obsngenetique/cadrages/cadr2006/c_no26_06/ci_no26_06_02.html; Arthur CAPLAN, « Is it wrong to try to improve human nature? », dans Paul Miller et James Wilsdon (dir.), *Better Humans? The Politics of Human Enhancement and Life Extension*, DEMOS, collection 21, 2006 [en ligne] <http://www.demos.co.uk/catalogue/betterhumanscollection/>.

269. Kate DOUGLAS *et al.*, « 11 Steps to a Better Brain », *NewScientist.com*, 25 mai 2005 [en ligne] <http://www.newscientist.com/channel/being-human/mg18625011.900>; Andrea NURKO et Megan ROARTY, « Students turn to study drugs to improve grades, concentration », *GW Hatchet*, 19 avril 2004 [en ligne] <http://www.gwhatchet.com/media/storage/paper332/news/2004/04/19/Style/Students.Turn.To.Study.Drugs.To.Improve.Grades.Concentration-64366.shtml?nrewrite200606011448&sourcedomain=www.gwhatchet.com>.

270. *Medical News Today*, « FDA panel suggests adding black box warning to ADHD medications about risk of sudden death, heart problems », 16 février 2006 [en ligne] <http://www.medicalnewstoday.com/medicalnews.php?newsid=37631>.

mortalité, convoitée par certains groupes comme les transhumanistes, est-elle moralement acceptable? Les nanotechnologies appliquées au domaine des neurosciences posent ces questions de façon accrue, notamment grâce aux possibilités de manipulation du cerveau à l'aide de drogues ou encore aux interfaces homme-machine qui sont en voie de développement.

Le débat sur ces pratiques en émergence ne fait que s'amorcer, et la Commission y accordera une importance toute particulière dans ses travaux à venir sur les neurosciences²⁷¹. Entre-temps, elle encourage le dialogue sur ces questions afin qu'il conduise vers des prises de position claires quant aux valeurs à privilégier face au développement technologique, de même que sur ce qu'implique le fait d'être humain et membre d'une société définie dans le temps et l'espace.

Le rapport de l'être humain avec la nature

Tout comme c'est le cas en ce qui concerne le rapport au soi et la façon dont chacun se définit en tant qu'être humain, le développement et l'utilisation grandissante des produits issus des nanotechnologies pourraient contribuer à modifier le regard posé, individuellement et collectivement, sur l'environnement. Dans un monde technicisé où l'artificiel côtoie le naturel et s'y confond, quelques repères philosophiques s'avèrent essentiels. « Le problème, souligne Jean-Pierre Dupuy, n'est plus de savoir jusqu'à quel point on peut ou on doit "transgresser la nature". Le problème, c'est que la notion même de transgression est sur le point de perdre tout son sens. L'homme ne rencontrera jamais plus qu'un monde à l'image de ses propres créations artificielles²⁷². »

Le rapport que l'être humain entretient avec la nature a beaucoup changé au cours des siècles. Dominé pendant une grande partie de son histoire par la nature et ses éléments, l'être humain, grâce aux développements de la science et de la philosophie, a pu mieux comprendre le monde qui l'entoure et objectiver – mais aussi contrôler en partie – son environnement.

Avec la science viennent non seulement des connaissances qui influencent la capacité d'agir de chacun, mais aussi la compréhension des effets des actions de l'être humain sur l'environnement. La notion de responsabilité est importante dans ce contexte, et il faut rappeler que le pouvoir d'agir sur les éléments se double d'une responsabilité quant aux effets qui en découlent.

De plus en plus, les philosophes et les environnementalistes développent un discours visant à déterminer les valeurs, les attitudes et les comportements que manifestent les humains à l'égard des animaux, des objets naturels ou encore à l'égard de la biosphère; de telles réflexions font partie de l'éthique environnementale, une discipline relativement récente. Comme l'observe Luc Bégin, l'éthique environnementale est en quelque sorte le prolongement des éthiques traditionnelles pour certains spécialistes, alors que pour d'autres il s'agit véritablement d'un nouveau courant de pensée dont l'approche est bien différente²⁷³.

La valeur qu'une société attribue à l'environnement (c'est-à-dire à la faune, à la flore, aux écosystèmes, etc.) dictera en partie les actions à entreprendre pour sa préservation (par exemple décontaminer des sites afin que la vie animale et végétale s'y développe à nouveau) ou pour réduire au minimum les effets directs ou indirects d'un mode de vie qui peut s'avérer néfaste à l'environnement (par exemple en diminuant l'utilisation des voitures ou en rendant la consommation d'essence des véhicules plus efficiente).

En éthique de l'environnement, trois modèles conceptuels se distinguent. Le premier est utilitariste, c'est-à-dire que la nature n'a de valeur que parce qu'elle a une utilité pour l'être humain. Il s'agit d'un courant anthropocentrique fort, où l'homme est la mesure de toute chose. Un deuxième modèle, celui endossé notamment par le gouvernement du Québec avec l'adoption de la *Loi sur le développement durable* et la définition qui a été retenue pour le concept²⁷⁴, constitue un anthropocentrisme faible où l'interdépendance des êtres humains et de la nature

271. *Op. cit.*

272. Jean-Pierre DUPUY, « Le problème théologico-scientifique et la responsabilité de la science », Les effets sur le rapport à la nature (effets ontologiques), 2004 [en ligne] http://formes-symboliques.org/article.php3?id_article=66.

273. Luc BÉGIN, « Éthique environnementale », dans Gilbert Hottois et Jean-Noël Missa (dir.), *Nouvelle encyclopédie de bioéthique. Médecine. Environnement. Biotechnologie*, Bruxelles, Éditions DeBoeck Université, 2001, p. 399.

274. Voir le chapitre 2 du présent avis.

est reconnue. Enfin, le troisième modèle conceptuel est biocentrique, c'est-à-dire que toute vie est considérée comme ayant la même valeur, qu'elle soit humaine, animale ou végétale. Selon ce dernier modèle, la nature a une finalité qui lui est propre ainsi que des droits; l'être humain ne peut en aucun cas prétendre la modifier ou la manipuler pour son propre bénéfice.

C'est dans l'esprit de la *Loi sur le développement durable* que la Commission considère que l'être humain vit en interdépendance avec l'environnement. La société et ses décideurs doivent tenir compte de cette interdépendance au moment de prendre des décisions qui pourraient avoir un impact sur la qualité de l'environnement, que ce soit dans l'immédiat ou pour les générations futures. De plus en plus, et notamment à la suite de l'adoption du protocole de Kyoto, des efforts sont réalisés en ce sens localement et à l'échelle internationale. Jour après jour, cependant, l'actualité et les comportements de chacun, décideur ou simple citoyen, sont là pour rappeler qu'il y a parfois une marge entre le discours et la pratique.

Dans l'état actuel du développement des nanotechnologies et considérant les possibilités que ces technologies font miroiter au regard de la préservation ou de la restauration de l'environnement, elles pourraient s'avérer un atout non négligeable dans l'amélioration de la qualité environnementale; en contrepartie, cependant, et comme il a été souligné plus haut, il faut reconnaître que certaines applications pourraient également constituer une source de détérioration. **Il y aura donc un équilibre à rechercher dans l'utilisation des nanotechnologies afin d'en tirer le meilleur parti possible au bénéfice du plus grand nombre et dans le respect de l'environnement. Ce sont là des décisions qui concernent l'ensemble de la société et qui doivent donc être soumises au débat public,** un thème de gouvernance abordé dans la prochaine section.

Préoccupations éthiques non exclusives aux nanotechnologies

Ainsi qu'il a été mentionné précédemment, le développement des nanotechnologies suscite un questionnement éthique quant à leurs effets possibles sur la santé et sur l'environnement, à leurs applications dans le domaine de la sécurité ou encore à la représentation de l'être humain et son rapport à la nature. Mais la Commission a également pu constater que les nanotechnologies soulèvent d'autres préoccupations d'ordre éthique qui ne leur sont pas spécifiques, ni totalement nouvelles, mais qui ne peuvent être occultées. Ces préoccupations sont en lien avec la gestion des nanotechnologies en matière de gouvernance et de développement économique, ainsi qu'avec le rôle que peut y jouer le citoyen. La Commission estime que le développement rapide des nanotechnologies impose d'y réfléchir dans le cadre du présent avis et de proposer des pistes de solution qui épousent de façon flexible la cadence de leur développement afin que s'instaure une gestion éthique et responsable des nanotechnologies.

En lien avec la gouvernance

Les gouvernements ont la responsabilité de veiller à la protection de l'environnement, de la santé humaine et du bien-être de la collectivité en général. Cette responsabilité se traduit par des actions liées à la gouvernance, c'est-à-dire «la manière d'orienter, de guider, de coordonner les activités d'un pays, d'une région, d'un groupe social ou d'une organisation privée ou publique²⁷⁵». Selon Einsiedel et Goldenberg de l'Université de Calgary, la gouvernance englobe les questions concernant la légitimité, les mesures de reddition de comptes ainsi que la gestion des tensions inhérentes dans une société entre le maintien de la confiance du public en ce qui concerne la façon dont les décisions sont prises et le rôle qu'y jouent divers acteurs (comme les entreprises et les bureaucraties gouvernementales, voire la loi du marché)²⁷⁶. À un titre ou à un autre, elle concerne l'ensemble des acteurs politiques, sociaux et économiques.

275. OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique*, op. cit.

276. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, op. cit., p. 31.

À court ou à moyen terme, la Commission considère qu'il faudra collectivement se poser un certain nombre de questions relativement au développement des nanotechnologies²⁷⁷ ou d'autres technologies émergentes, par exemple : Qui en contrôle l'utilisation, mais également qui en bénéficie²⁷⁸ ? Quels sont les risques et qui les assume²⁷⁹ ? Qui oriente les stratégies de subventions publiques en R-D sur les nouvelles technologies ? Les décideurs politiques ont-ils un devoir de s'assurer que les produits issus des nanotechnologies sont sécuritaires pour la santé et pour l'environnement ? Les règles existantes, mises en place avant l'avènement de ces technologies, répondent-elles encore aux besoins de la société à cet égard²⁸⁰ ? Toutes ces questions relèvent de la gouvernance d'une société et ne sont pas sans rappeler la saga des OGM : placée devant un fait accompli, la population a boycotté les produits génétiquement modifiés. Des leçons importantes ont été tirées de cette expérience difficile. S'agissant des nanotechnologies, les promoteurs veulent à tout prix éviter qu'une situation semblable se produise et misent sur l'information de la population et sur l'instauration d'un dialogue qui permettra d'assurer l'acceptabilité sociale de ces nouvelles technologies²⁸¹. Il importe cependant d'ajouter un élément souvent oublié au moment de comparer avec les OGM : il reste encore beaucoup de recherche à faire dans le domaine des nanotechnologies avant que la diversité d'applications nanotechnologiques que le secteur laisse entrevoir envahisse le marché. C'est d'ailleurs pourquoi les acteurs concernés s'entendent pour dire qu'il faut saisir cette occasion pour débattre collectivement des choix sociaux qui doivent être faits au regard des nanotechnologies.

Dans les paragraphes qui suivent, la Commission s'interroge sur quelques-uns des mécanismes susceptibles de contribuer à une gouvernance éthique du développement technologique, et plus particulièrement des nanotechnologies. À cette fin, la Commission s'appuie

sur des valeurs comme la légitimité, la transparence, la démocratie et la responsabilité.

La légitimité et la transparence du processus décisionnel

D'entrée de jeu, il importe de rappeler que divers ministères fédéraux documentent les répercussions potentielles du développement nanotechnologique dans leur sphère de compétences respectives et qu'un réseau interministériel de la fonction publique fédérale sur les nanotechnologies a été mis en place par Industrie Canada en 2002. Pour sa part, le conseiller national des sciences auprès du premier ministre insiste sur le besoin d'une stratégie nationale en nanotechnologies depuis son arrivée en fonction, en 2004²⁸². À cet effet, le ministre de l'Industrie a d'ailleurs commandé au Conseil consultatif de la science et de la technologie (CCST) un rapport sur les perspectives du Canada en nanotechnologies comme premier élément vers une stratégie nationale qui devait être déposé en avril 2005. Les élections ont retardé la publication du rapport, mais quatre études d'appui ont été publiées dans le site Internet du CCST²⁸³.

Au Québec, NanoQuébec est reconnu comme le chef de file en matière de développement et de promotion des nanotechnologies. L'organisme siège à de nombreux comités dont les travaux portent sur des aspects spécifiques de la gouvernance, non seulement en ce qui a trait aux orientations de la recherche publique, au processus de normalisation et aux normes ISO touchant les nanotechnologies, mais également en ce qui a trait aux enjeux éthiques que soulèvent ces technologies. Il est également l'instigateur d'un comité de travail coprésidé par le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et par le Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC). Celui-ci a pour mandat « d'élaborer une stratégie et un plan d'action concernant le développement et l'organisation de l'expertise en recherche

277. À cet égard, voir l'annexe 3 qui énumère les questions à poser en ce qui concerne la recherche, le développement et la commercialisation des nanotechnologies au Canada. Ces questions sont tirées de Lorraine SHEREMETA et Abdallah S. DAAR, « The Case for Publicly Funded Research on the Ethical, Environmental, Economic, Legal and Social Issues Raised by Nanoscience and Nanotechnology (NE³LS) », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004.

278. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. x.

279. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, *op. cit.*, p. 30.

280. INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *op. cit.*, p. 8.

281. Voir, entre autres, Ronald SANDLER et W.D. KAY, « The GMO-Nanotech (Dis)Analogy ? », *Bulletin of Science, Technology and Society*, vol. 26, n° 1, février 2006, p. 57-62 ; Mark ROSEMAN, *op. cit.*, p. 14.

282. Arthur J. CARTY, *Discours principal – Nanoforum Canada*, Forum canadien sur la nanoscience et la nanotechnologie, Edmonton, 17 juin 2004 [en ligne] http://science.pco-bcp.gc.ca/docs/speeches discours/speechesdiscours/20040617_nanoforum_f.pdf.

283. Voir http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html.

et en formation supérieure ainsi que de la diffusion du savoir, sur les aspects socio-économiques, éthiques et environnementaux, nécessaires au développement sûr et responsable des nanotechnologies²⁸⁴».

Un rôle important attribué aux gouvernements du Québec et du Canada est de décider (ou de déléguer la décision, le cas échéant) des axes de développement économique, des orientations de la recherche publique, du soutien aux entreprises et des mesures d'encadrement nécessaires en matière de nanotechnologies. De plus en plus, le processus décisionnel tend à une plus grande transparence, et les gouvernements s'engagent, par exemple, dans des activités destinées à solliciter l'opinion publique en ce qui regarde les choix collectifs à faire (avec des organismes comme le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement [BAPE] ou des formules de type forum) ou encore en sondant la population sur son degré d'acceptation d'une mesure particulière. À l'échelle canadienne, une initiative récente revient au conseiller national des sciences qui a convoqué un panel d'experts internationaux en juillet 2005 afin d'évaluer les forces de recherche canadiennes en nanotechnologies. Le rapport qui résulte de cette rencontre insiste notamment sur la nécessité de faire participer la population aux discussions concernant le développement des nanotechnologies et l'orientation de la recherche²⁸⁵.

À quelle marge de manœuvre légitime les élus et leurs exécutants sont-ils en droit de s'attendre? Des

regroupements ponctuels de citoyens et des groupes de défense des intérêts du public demandent de plus en plus à être parties prenantes dans le processus décisionnel. Quelle place leur accorder²⁸⁶ dans un contexte où les sujets sont complexes et où la population est souvent relativement peu informée des avancées scientifiques considérées? À cet égard, une analyse de Michael D. Mehta révèle que, dans le secteur des biotechnologies, «l'utilisation de l'équivalence substantielle²⁸⁷ et le besoin de se fier à une distinction entre le produit et le processus a amené une approche régulatrice qui empêche le public de participer de façon importante aux décisions. Si les futurs organismes de contrôle des nanotechnologies adoptent la même attitude, le public sera probablement exclu de façon systématique sous couvert de l'évaluation scientifique (*science-based assessment*)²⁸⁸».

Dans un cadre démocratique, la légitimité passe invariablement par la transparence du processus décisionnel. C'est un sujet sur lequel la Commission a beaucoup insisté dans son avis sur les organismes génétiquement modifiés et qui l'a conduite à formuler une recommandation à cet effet²⁸⁹. La transparence se manifeste également dans les façons d'informer la population; les demandes répétées d'étiquetage des produits alimentaires génétiquement modifiés traduisent des attentes pour une plus grande transparence de la part des régulateurs et des producteurs²⁹⁰, en même temps que l'étiquetage apparaît comme une condition d'exercice du libre choix accordé à chaque citoyen dans une société démocratique et pluraliste.

284. http://nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/explorateur.jsp?currentlySelectedSection=415&removed%20Section=-1&showMoreOptions=false&ascending=false&showCancel=true&type=-1&intention=%20&home=false&chosenSections=-1. Les travaux de ce comité devraient se conclure au moment où paraîtra le présent avis de la Commission.

285. BUREAU DU CONSEILLER NATIONAL DES SCIENCES (Canada), *Assessment of Canadian Research Strengths in Nanotechnology: Report of the International Scientific Review Panel*, novembre 2005, p. 12-13.

286. Voir à ce sujet le chapitre 4 de l'avis de la Commission sur les banques d'information génétique, *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique*, op. cit., p. 59-69.

287. Dans son avis sur les OGM, la Commission résumait ainsi la notion d'équivalence substantielle: «Dans la mesure où un produit est considéré équivalent en substance à un produit qui existe déjà, il s'insère dans les mêmes filières d'approbation que n'importe quel autre produit.» Des travaux sont en cours dans les organismes qui appuient cette approche dans l'évaluation des produits nouveaux, notamment à Santé Canada et à l'Agence canadienne d'inspection des aliments. Voir l'avis de la Commission, p. 33 et 34.

288. (Traduction libre) Michael D. MEHTA, «From Biotechnology to Nanotechnology: What Can We Learn from Earlier Technologies?», *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004, p. 36 [en ligne] <http://www.nanoandsociety.com/ourlibrary/documents/mehta-feb2004a.pdf>.

289. «Que le gouvernement du Québec intervienne auprès du gouvernement du Canada a) pour que le processus actuel d'évaluation des risques que présentent les produits transgéniques pour la santé humaine ou animale ou pour l'environnement s'effectue en consultation ouverte avec un comité formé d'experts indépendants issus des sciences de la nature et des sciences humaines, de même que de représentants du public, lorsque la situation s'y prête; b) pour que le comité d'experts, par souci de transparence, rende ses travaux publics et facilement accessibles.» COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Pour une gestion éthique des OGM*, op. cit., p. 64.

290. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, op. cit., p. 31.

Recommandation n° 5

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, avec ses collègues des ministères et des organismes concernés, amorce un processus d'information et d'échanges auprès de la population afin de bien circonscrire, et en toute transparence, les enjeux scientifiques, économiques, sociaux et éthiques qui sont associés au développement des nanotechnologies.

Si les connaissances actuelles ne permettent pas de définir un modèle idéal de consultation et de participation du public avant l'étape de prise de décision, il n'en demeure pas moins que diverses formules ont été adoptées dans d'autres sociétés (comme les conférences citoyennes ou autres activités de débat public) et qu'elles pourraient être adaptées aux besoins actuels de la société québécoise en la matière. La Commission encourage la poursuite des recherches et de l'expérimentation dans ce domaine.

Les mesures d'encadrement et de reddition de comptes

L'encadrement des nanotechnologies constitue un autre aspect de la gouvernance qui permet la gestion de conflits inhérents à la présence d'intérêts divergents dans une même société ou entre nations. Comme en témoigne le chapitre 2, cet encadrement peut prendre diverses formes : législation, réglementation, code de déontologie, guide de bonnes pratiques, normes, lignes directrices ou déclarations, etc. Il dicte les conditions d'exercice de l'activité liée aux nanotechnologies ; il confère des droits mais aussi des responsabilités aux divers acteurs engagés dans le développement et l'innovation nanotechnologiques.

Au Canada comme ailleurs dans le monde, aucune agence gouvernementale n'a pleins pouvoirs sur l'encadrement des nanotechnologies. Chacune occupe son propre champ de compétences en la matière et la tendance serait à l'adaptation des lois existantes plutôt qu'à la création de nouvelles lois²⁹¹. Il est particulièrement complexe de réglementer ou d'encadrer des technologies en émergence, surtout lorsqu'il existe encore peu de données

concernant leurs effets possibles sur la santé humaine et sur l'environnement. Cependant, des « repères sociaux » peuvent appuyer l'exercice de la gouvernance, comme le principe de précaution²⁹² et l'approche du cycle de vie²⁹³, déjà abordés précédemment.

La Commission reconnaît que l'encadrement des nanotechnologies nécessite une meilleure connaissance des conséquences potentiellement néfastes que pourraient entraîner l'introduction et la dissémination de nanoparticules dans l'environnement ou leur pénétration dans les organismes vivants. Cependant, une telle contrainte ne doit en rien limiter les actions de gouvernance relatives aux activités de veille et de réflexion qui doivent accompagner l'émergence d'une nouvelle technologie et celles qui assurent l'adaptation des encadrements existants lorsque les circonstances le dictent. **Il importe aussi que le réseau des divers acteurs du domaine des nanotechnologies se concerte pour adopter des comportements qui s'inscrivent dans une perspective de développement durable. Pour la Commission, la concertation des parties prenantes constitue une prémisses à l'élaboration d'un modèle de gouvernance flexible, adapté à la réalité des nanotechnologies et apte à tenir compte des préoccupations éthiques que ces technologies soulèvent.**

Un dernier point mérite d'être signalé au regard de la mise en place de mesures d'encadrement : il est impératif de s'assurer que ces règles seront respectées. Par exemple, les mesures de contrôle de la qualité, la vérification des données toxicologiques, les inspections pour vérifier la salubrité des lieux de production ainsi que le respect de la santé et de la sécurité des travailleurs et des citoyens, etc., sont des opérations qui doivent être effectuées de façon systématique. Aux prises avec des contraintes budgétaires importantes, comment les agences gouvernementales chargées de protéger la santé humaine et l'environnement pourront-elles remplir adéquatement leur mandat avec l'arrivée sur le marché de nouvelles catégories de produits encore méconnus ? Les mesures de protection seront nécessairement déterminées par les coûts qui leur sont associés²⁹⁴, mais

291. J. Clarence DAVIES, *op. cit.*

292. Michael D. MEHTA, *op. cit.*, p. 37.

293. INTERNATIONAL RISK GOVERNANCE COUNCIL, *Survey on Nanotechnology Governance, Volume A. The Role of Government*, IRGC Working Group on Nanotechnology, décembre 2005, p. 18 [en ligne] http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/fremde_publicationen/IGRC_Nano_Governance.pdf.

294. MERIDIAN INSTITUTE et NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, *op. cit.*, p. 12.

également par la volonté politique et par celle des divers acteurs concernés. À quel point les modalités actuelles de gestion du risque permettent-elles de considérer les multiples facettes des technologies émergentes et de composer avec l'incertitude qui les accompagne en matière de risque?

Recommandation n° 6

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation demande aux organismes subventionnaires, en collaboration avec les divers acteurs concernés, de créer un programme de recherche multidisciplinaire sur les impacts des nouvelles technologies et sur la gestion du risque associé aux nanotechnologies, qui tienne compte de leurs dimensions éthique et sociale.

En lien avec l'activité économique liée aux nanotechnologies

L'économie représente une sphère d'activité importante dans toute société. Le développement du savoir, la disponibilité sur le marché du travail d'employés hautement qualifiés, des entreprises dynamiques et un marché ouvert sont autant de conditions au maintien et à l'amélioration du niveau de vie d'une population. Dans un contexte de mondialisation, il importe également de se soucier des besoins des sociétés moins fortunées et de veiller à une distribution équitable de la richesse, mais aussi des risques. Enfin, la Commission désire ouvrir la discussion sur la possibilité pour les entreprises de bâtir des profils de consommation grâce aux capacités de stockage sans cesse croissantes de données. Les valeurs qui ont guidé la réflexion de la Commission dans cette section sont la responsabilité, la solidarité, la liberté, la qualité de vie, la justice sociale et l'équité ainsi que le respect de la vie privée.

Les choix éthiques dans le développement de l'activité économique liée aux nanotechnologies au Québec

S'il n'existe pas de consensus sur l'impact spécifique qu'auront les nanotechnologies sur l'économie, les

spécialistes estiment néanmoins que les retombées économiques pourraient être de l'ordre de 2 600 milliards de dollars américains en 2014 à l'échelle mondiale²⁹⁵. Le rapport de la Royal Society note que les effets seront marginaux à court terme; cependant, comme les nanotechnologies rendront possibles ou amélioreront plusieurs applications, elles pourraient avoir un impact significatif à long terme, en favorisant la croissance du produit national brut (PNB), une plus grande efficacité et moins de gaspillage lors de la transformation industrielle²⁹⁶.

Il ne faudrait pas sous-estimer l'importance de ces affirmations, notamment en ce qui concerne les activités économiques propres au Québec. En effet, les nanotechnologies pourraient avoir un effet positif et significatif sur les industries traditionnelles – comme l'agroalimentaire, le textile ou encore les pâtes et papiers – en favorisant le développement de produits et de services à valeur ajoutée. En bout de ligne, une richesse collective accrue permettrait d'investir dans l'éducation ou la santé, par exemple, deux domaines où l'argent fait toujours cruellement défaut.

Depuis 2004, le Conseil de la science et de la technologie du Québec coordonne le projet Perspective Science-Technologie-Société (STS) dont le premier objectif est de sensibiliser tous les secteurs de la société québécoise à l'importance et à l'utilité de la science et de la technologie pour comprendre et résoudre les problèmes socioéconomiques²⁹⁷. Le deuxième objectif de ce projet consiste à convier la communauté scientifique québécoise à participer aux finalités sociales et économiques de la science et de la technologie²⁹⁸. **La Commission est d'avis que ce type d'initiatives devrait être appliqué au moment où sera élaborée une stratégie québécoise de développement des nanotechnologies, de façon qu'il soit possible de répondre aux besoins tant économiques que sociaux propres au Québec et de considérer, de manière spécifique, les enjeux éthiques liés à ces technologies.**

Dans un rapport datant de 2005, le President's Council of Advisors on Science and Technology aux États-Unis rappelle que les nouvelles technologies peuvent en déplacer d'autres qui sont obsolètes et susciter un

295. LUX RESEARCH, « Revenue from Nanotechnology-Enabled Products to Equal IT and Telecom by 2014, Exceed Biotech by 10 Times », Communiqué, 25 octobre 2004 [en ligne] http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_SizingReport.pdf.

296. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 52.

297. Voir <http://www.cst.gouv.qc.ca/LE-PROJET-PERSPECTIVES-Science>.

298. *Ibid.*

mouvement parallèle dans les possibilités d'emploi²⁹⁹. Comme ces nouveaux emplois demandent parfois des habiletés différentes, l'organisme souligne que de tels changements peuvent poser des défis majeurs en ce qui concerne la formation de la main-d'œuvre et le système éducatif³⁰⁰. Pour la Commission, il s'agit là d'un enjeu éthique important, puisque, souvent, les travailleurs les plus vulnérables de la société sont les victimes des transformations du marché du travail qu'entraîne l'émergence de nouvelles technologies.

Dans la même optique la Commission s'interroge sur le sort réservé aux PME québécoises qui soutiennent le développement des produits issus des nanotechnologies, quand cesse l'aide financière au démarrage qu'elles reçoivent généralement de l'État³⁰¹, à même les deniers publics. Le développement d'une économie de haut savoir exige que soient préservés de tels secteurs d'expertise technologique dans la collectivité et les emplois occupés par une main-d'œuvre hautement qualifiée. Lorsque ces entreprises disparaissent ou sont délocalisées à l'étranger, la Commission estime qu'il y a un gaspillage de fonds publics qui auraient pu être utilisés à d'autres fins ainsi qu'une perte d'expertise importante pour la société.

Recommandation n° 7

La Commission recommande :

que le ministre du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation, advenant l'élaboration d'une stratégie québécoise de développement des nanotechnologies, prenne en compte les questions éthiques et sociales que ces technologies soulèvent, particulièrement en matière d'emploi et de formation de la main-d'œuvre.

Le fossé nanotechnologique dans le contexte de la mondialisation des marchés

De nombreux auteurs³⁰² soulignent la possibilité que les nanotechnologies amplifient l'écart entre les pays riches et les pays pauvres et creusent un fossé nanotechnologique (un *nano-divide*) en matière d'acquisition des connaissances et d'utilisation de ces nouvelles technologies. Si le progrès économique dépend de plus en plus de l'exploitation des connaissances scientifiques, l'investissement nécessaire pour l'acquisition de ces nouvelles connaissances et le développement de nouvelles façons de faire risque en effet d'accentuer cet écart³⁰³.

L'orientation de la R-D nanotechnologique

Dans sa réflexion sur les préoccupations éthiques qu'entraîne l'activité économique liée aux nanotechnologies, la Commission se pose la question suivante : une société privilégiée a-t-elle une obligation morale de développer et de partager avec des nations plus pauvres les avancées technologiques dont elles pourraient bénéficier ? Certains observateurs, comme Mohamed H.A. Hassan, président de l'African Academy of Sciences et directeur général de l'Academy of Sciences for the Developing World, voient plusieurs utilités potentielles que les nanotechnologies pourraient avoir pour les pays pauvres, comme la création de systèmes de filtration plus efficaces afin de produire de l'eau propre ou l'approvisionnement en énergie verte et à bon marché³⁰⁴. Peter Singer et ses collaborateurs rappellent que les nanotechnologies pourraient contribuer de façon significative à l'atteinte de cinq des huit objectifs du projet *Objectifs du Millénaire pour le développement* proposé par les Nations Unies et qui vise à promouvoir le

299. PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *op. cit.*, p. 35. La Royal Society abonde en ce sens, mentionnant que, de manière générale, l'introduction de nouvelles technologies crée des gagnants et des perdants ; par exemple, lorsque des emplois sont perdus dans un secteur donné au profit d'un autre : THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 52.

300. *Ibid.*

301. Sur ce sujet, voir Sylvain D'AUTEUIL-ROBILLARD, « Les orphelins du développement économique », *PME*, vol. 21, n° 10, décembre-janvier 2005, p. 40-42.

302. Voir entre autres THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.* ; CENTRE SUD, *Effets potentiels des nanotechnologies sur les marchés de produits de base : répercussions sur les pays en voie de développement tributaires de produits de base. Agenda lié au commerce pour le développement et l'équité (T.R.A.D.E.)*, document de recherche n° 4, préparé par ETC, novembre 2005, p. 18 [en ligne] http://www.southcentre.org/publications/researchpapers/ResearchPapers4_FR.pdf ; Anisa MNYUSIWALLA, Abdallah S. DAAR et Peter A. SINGER, « "Mind the Gap" : Science and Ethics in Nanotechnology », Institute of Physics Publishing, *Nanotechnology*, 14, R9-R13, 2003 [en ligne] <http://www.utoronto.ca/jcb/home/documents/nanotechnology.pdf> ; NANOFORUM.ORG, *4th Nanoforum Report: Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of Nanotechnology*, juin 2004 [en ligne] http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~scid~341~.html?action=longview_publication&.

303. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 52.

304. Mohamed H.A. HASSAN, « Small Things and Big Changes in the Developing World », *Science, Policy forum, Nanotechnology*, vol. 309, 1^{er} juillet 2005 [en ligne] <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/309/5731/65.pdf>.

développement humain, social et économique à l'échelle de la planète. Ces objectifs sont : réduire l'extrême pauvreté et la faim, assurer un développement durable, réduire la mortalité des enfants de moins de cinq ans, améliorer la santé maternelle et combattre le VIH-sida, le paludisme et d'autres maladies³⁰⁵.

Quels produits issus des nanotechnologies seront privilégiés et à qui bénéficieront-ils ? À l'instar de Singer et de ses collègues, Hassan croit qu'« il est fort probable que la majorité des ressources et de l'expertise, tant au Nord qu'au Sud, s'applique à des produits et à des services qui verront leur plus grande part de marché dans le Nord, là où les consommateurs plus fortunés habitent³⁰⁶ ». À court terme donc, il y a de fortes chances que le développement des nanotechnologies se fasse au profit de ceux qui possèdent déjà les richesses et le pouvoir, et au détriment du reste du monde. Cependant, la possibilité de concevoir et de développer l'innovation nanotechnologique de façon à en faire bénéficier les pays en voie de développement ne devrait pas d'emblée être mise à l'écart. Les gouvernements, les entreprises, les fondations et les organisations non gouvernementales sont ou peuvent être sollicités à divers degrés dans la gestion du développement nanotechnologique. Pour ces divers acteurs, l'occasion se présente aujourd'hui de concerter leurs efforts afin de maximiser la réflexion et d'agir de façon solidaire envers les plus démunis.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Dans la même veine, la Commission suggère que s'amplifient ou se tissent des liens de collaboration entre les universités, les fonds subventionnaires et les pays en développement. Des partenariats de recherche en nanotechnologies, des échanges d'étudiants et de professeurs entre universités, ainsi que la mise en place de programmes de subventions dont l'objectif spécifique est de répondre aux besoins signalés par les pays en développement à l'égard des nanotechnologies devraient être considérés par les organismes concernés.

La possession de l'expertise en nanotechnologies

En général, qui contrôle la R-D contrôle également les moyens de production et l'offre de produits et services. Si les besoins des pays en développement sont pris en considération dans les orientations de la recherche, il faut également miser sur la création d'industries locales qui produiront une richesse durable. Les partenariats entre ceux qui possèdent le savoir et les capitaux et ceux qui possèdent un marché à exploiter doivent être encouragés, à la condition qu'ils soient conçus au bénéfice de chacun et que le partage des responsabilités soit équitable ; il s'agit là d'une question de respect et de solidarité³⁰⁷.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

Considérant que la solidarité humaine se traduit notamment par des gestes de collaboration et de partage de la richesse, la Commission encourage le soutien de la formation de chercheurs et la mise en place d'infrastructures de R-D dans les pays en émergence et dans ceux en développement, en vue de favoriser l'acquisition d'une expertise industrielle dans ces pays et d'éviter que se creuse davantage le fossé technologique.

La propriété intellectuelle et la gestion des brevets

La gestion des brevets et de la propriété intellectuelle peut être vue comme une source dynamique d'innovation, mais également comme un frein à l'accès aux connaissances et aux outils nécessaires à la R-D. Tout en reconnaissant que cette problématique ne concerne pas uniquement le domaine des nanotechnologies et qu'il s'agit d'une compétence fédérale, la Commission croit utile d'en faire état brièvement dans le présent avis, car les façons de faire actuelles risquent d'avoir un impact sur la recherche fondamentale et sur l'innovation technologique dans ce domaine.

Bien que la possession de brevets soit considérée comme un avantage sur le plan économique, l'expérience dans d'autres domaines scientifiques que celui des

305. Peter A. SINGER, Fabio SALAMANCA-BUENTELLO et Abdallah S. DAAR, *op. cit.*, p. 58 ; voir également NATIONS UNIES, *Investir dans le développement : plan pratique pour réaliser les objectifs du Millénaire pour le développement*, Projet Objectifs du Millénaire, Rapport au Secrétaire général de l'ONU, New York, 2005 [en ligne] <http://www.unmillenniumproject.org/documents/french-complete-highres.pdf>.

306. (Traduction libre) Mohamed H.A. HASSAN, *op. cit.*, p. 66 ; Peter A. SINGER, Fabio SALAMANCA-BUENTELLO et Abdallah S. DAAR, *op. cit.*, p. 57.

307. La réflexion sur de nouvelles formes de partenariat a déjà commencé dans divers forums. Par exemple, les participants d'un atelier organisé en juin 2004 concernant *le dialogue international sur la R-D nanotechnologique responsable* ont suggéré que la poursuite du dialogue à l'échelle internationale ainsi que la collaboration aideraient les pays en voie de développement à participer à la R-D en nanotechnologies – MERIDIAN INSTITUTE et NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, *op. cit.*, p. 8 ; voir également p. 19 sur l'apport possible du secteur privé.

nanotechnologies démontre que l'attribution de brevets trop larges, ou qui ne respectent pas de manière stricte les critères de nouveauté et d'apport inventif d'une découverte pouvant être brevetée, peut aller à l'encontre du bien public³⁰⁸. À cet égard, les problèmes suivants sont généralement mentionnés en ce qui concerne la possession de brevets, par exemple : la difficulté d'obtenir les licences nécessaires en raison du nombre élevé de propriétaires de brevets dans un domaine de recherche donné ou pour une application en particulier, la décision de ne pas vendre de droits d'utilisation à un tiers – ce qui peut être légal dans certains pays comme les États-Unis – ou, encore, les redevances très élevées que demandent certains propriétaires en échange de l'utilisation de leur technologie³⁰⁹. Dans ces conditions, l'accès à la connaissance devient un enjeu majeur et peut même devenir une source d'iniquités.

Une partie des problèmes entourant la propriété intellectuelle et la gestion des brevets peut cependant être attribuée à la méconnaissance du fonctionnement d'un tel système d'exploitation des connaissances. Galembeck, chimiste d'origine brésilienne, estime qu'une très grande partie des scientifiques qui ne viennent pas des pays du G-7 (maintenant le G-8) ne lisent pas les brevets et ne pensent pas à en déposer pour leurs découvertes. Cette situation a deux conséquences dommageables. Premièrement, plusieurs efforts scientifiques sont réalisés en vain, puisque les objectifs de recherche ont peut-être déjà été atteints par d'autres équipes qui possèdent dès lors les brevets d'exploitation. Deuxièmement, des scientifiques qui travaillent dans des pays émergents contribuent de plus en plus à la publication scientifique sans toutefois protéger les résultats de leur travail ; « ces informations nouvelles finiront par être transformées en produits et en processus que nous [les pays émergents] importerons, et qui apporteront avec eux la modernité, mais aussi le chômage et des pressions sur l'économie³¹⁰ ».

Un certain nombre de questions se posent également en ce qui concerne le contrôle public-privé en matière de propriété intellectuelle. Dans un domaine comme les nanotechnologies, où la technologie fait aussi progresser les connaissances fondamentales en physique, en chimie ou dans d'autres domaines, ne faudrait-il pas éviter qu'un financement mixte public-privé des efforts de recherche puisse se traduire par des limites imposées au développement de la connaissance en raison du système de protection intellectuelle actuellement en vigueur ? Einsiedel et Goldenberg posent ainsi le problème : « [...] la question de savoir à qui appartiennent les connaissances engendrées par des initiatives impliquant à la fois des universités publiques et des corporations privées demeure très problématique. [...] Des recherches entreprises par Baber [titulaire de la Chaire de recherche du Canada en science, en technologie et sur l'évolution sociale] démontrent que les conditions de financement des chercheurs universitaires [au Japon et à Singapour] ont diminué les résistances de ces derniers face à la transformation directe en valeur monétaire des connaissances provenant de la recherche. Une grande proportion de ce qui s'appelle nanotechnologies concerne l'acquisition de nouvelles connaissances en sciences fondamentales et sur les processus quantiques ; une situation qui pose un sérieux défi en ce qui a trait aux cadres de référence en vigueur en matière de droits de propriété³¹¹. »

Des solutions en vue

La gestion de la propriété intellectuelle et des brevets n'est pas une question simple et l'émergence depuis quelques années de compagnies qui ont pour objectif principal d'acheter des brevets en vue de les revendre au prix fort complique la donne³¹² ; la concentration des brevets entre les mains d'une minorité pourrait avoir pour conséquence de restreindre l'accessibilité aux technologies³¹³. Comme le notent Einsiedel et

308. Voir, entre autres, THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 53 et Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, *op. cit.*, p. 30.

309. David B. RESNIK, « A Biotechnology Patent Pool: An Idea Whose Time Has Come ? », *The Journal of Philosophy, Science & Law*, vol. 3, janvier 2003 [en ligne] <http://www.psljournal.com/archives/papers/biotechPatent.cfm>.

310. Fernando GALEMBECK, « Les questions éthiques posées par la nanotechnologie », allocution présentée lors de la 3^e session de la COMEST, 1-4 décembre 2003, Rio de Janeiro, UNESCO, p. 129 des *Actes* [en ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001343/134391fo.pdf>.

311. (Traduction libre) Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, *op. cit.*, p. 30.

312. Lisa K. ABE, *Nanotechnology Law: The Legal Issues*, Communication présentée dans le cadre de NanoForum 2005, Université McGill.

313. ETC GROUP, *From Genome to Atoms: The Big Down...*, *op. cit.*

Goldenberg, certains affirment, considérant le modèle de brevetage en biotechnologies, que la tendance actuelle pourrait bloquer, plutôt qu'encourager, l'innovation et qu'une façon de s'attaquer au problème serait de s'inspirer de la protection de la propriété intellectuelle utilisée en informatique pour les logiciels libres (*open source*) en ce qui a trait aux recherches financées par le public³¹⁴. Si ce modèle connaît bien des adeptes dans le milieu public, il faut se demander si son adoption par un plus grand nombre d'utilisateurs n'est pas freinée par le fait que le code source libre, contrairement au brevet, attribue une faible valeur financière à l'innovation (en général seulement sur l'aide technique).

Une autre possibilité serait l'établissement de communautés de brevets (*patent pools*)³¹⁵. Les communautés de brevets existent depuis plus d'un siècle³¹⁶; elles sont généralement vues comme des génératrices de concurrence, mais elles pourraient avoir l'effet contraire dans certaines circonstances³¹⁷.

Il est également intéressant de noter l'initiative récente des National Institutes of Health américains (NIH) dans le domaine des biotechnologies. Ceux-ci ont fait l'annonce d'un partenariat public-privé avec diverses entreprises pharmaceutiques afin d'accélérer la recherche en génétique sur des maladies multifactorielles. Les NIH ont assuré que les résultats des recherches ne deviendront pas la propriété des entreprises privées qui investissent dans ce projet, mais qu'ils seront accessibles à tous³¹⁸.

COMMENTAIRE DE LA COMMISSION

L'initiative des NIH soulève cependant un certain nombre de questions plus larges. Les initiatives fondées sur des partenariats publics-privés en matière de recherche et de mise en marché sont-elles équitables pour le Québec? Quels sont les effets positifs et négatifs de ces partenariats? Les bienfaits potentiels contrebalancent-ils les effets négatifs? Ces derniers peuvent-ils être amoindris ou éliminés? Serait-il possible de mettre en place des mesures incitatives en vue de favoriser l'activité philanthropique? Devant toutes ces questions, la Commission estime impératif qu'une réflexion poussée sur le rôle de la protection de la propriété intellectuelle dans un contexte d'innovation soit entreprise et que soient mises en évidence les questions d'éthique qui pourraient y être associées.

La collecte de renseignements personnels

La convergence des nanotechnologies et des technologies de l'information permettra de connecter des réseaux complexes de plus en plus puissants et très performants en matière de contrôle et de surveillance. Certains dispositifs nanométriques peuvent être facilement incorporés à divers produits électroniques et de tels développements pourraient servir à des fins diverses: assurer une plus grande sécurité et sûreté, prodiguer des soins de santé personnalisés ou offrir une vaste gamme d'avantages pour les entreprises (par exemple assurer le suivi et les autres types de contrôles sur le matériel et les produits). Cependant, il est aussi possible de concevoir de tels développements de façon à restreindre la sphère privée des individus ou de divers groupes, en effectuant de la surveillance invisible, en recueillant et en distribuant des

314. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, *op. cit.*, p. 30. Pour d'autres informations sur le sujet, voir également Francis ANDRÉ, *Libre accès aux savoirs/Open Access to Knowledge*, Paris, Futuribles, 2005, p. 47-49.

315. La communauté de brevets permet en général «aux titulaires qui en font partie d'utiliser des brevets mis en communauté, établit une licence type pour ces brevets à l'intention des preneurs de licence qui ne sont pas membres de la communauté et répartit les redevances parmi ses membres, conformément à l'accord». Voir *Normes et brevets* dans le site de l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle [en ligne] <http://www.wipo.int/patentscope/fr/developments/standards.html>.

316. Le Patent and Trademark Office américain retrace une des premières communautés de brevets en 1856 – il s'agissait de brevets ayant trait aux machines à coudre. Des initiatives récentes concernent des compagnies dans le domaine de l'électronique et des communications et touchent des produits manufacturés en conformité avec les formats DVD-ROM et DVD-Vidéo. Voir pour de plus amples renseignements UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, *Patent Pools: A Solution to the Problem of Access in Biotechnology Patents?*, Jeanne CLARK *et al.*, 5 décembre 2000 [en ligne] <http://www.uspto.gov/web/offices/pac/dapp/opla/patentpool.pdf>.

317. Pour plus de renseignements, voir la section sur la procompétitivité et l'antiprocompétitivité des communautés de brevets, UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, *op. cit.*, p. 6-7.

318. Lauran NEERGAARD, «Federal Project Probes Environment, Genes», *Washingtonpost.com*, 8 février 2006 [en ligne] <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/02/08/AR20060208 00793.html>.

informations personnelles sans consentement explicite, de même qu'en concentrant l'information dans les mains de ceux qui possèdent les ressources pour développer et contrôler de tels réseaux³¹⁹. Ces possibilités doivent être soigneusement évaluées, en tenant compte du contexte sociopolitique qui domine depuis les attentats du 11 septembre 2001 aux États-Unis.

Le marketing personnalisé représente un attrait évident pour le monde des affaires, qui pourrait ainsi mieux connaître les habitudes de consommation de sa clientèle et effectuer des campagnes ciblées auprès d'individus ou de groupes donnés. Cette pratique est déjà en vigueur³²⁰ et les capacités de stockage et de traitement toujours plus poussées que permettront les nanotechnologies pourraient amplifier ce phénomène.

La convergence des nanotechnologies et des technologies de l'information pourrait renforcer les inquiétudes des consommateurs relativement à l'utilisation de l'identification par radiofréquence ou RFID (*radio frequency identification*) en remplacement des codes à barres, une technique qui est actuellement à l'essai dans certains supermarchés et magasins³²¹, par exemple. Les préoccupations principales à cet égard sont : la possibilité de faire le lien entre une information personnelle (une carte de crédit) et un produit spécifique afin d'établir le profil de consommation d'un individu, de faire du marketing personnalisé à l'intention de cette personne et même de la suivre à la trace dans ses déplacements

quand elle a sur elle un produit muni d'une étiquette RFID. La collecte croissante de données sur une personne et la surveillance accrue, avec la possibilité de tracer des profils types très spécialisés à des fins de contrôle policier, social ou politique³²², font aussi partie des possibilités envisagées. Ces questions intéressent depuis quelques années le Commissariat canadien à la protection de la vie privée³²³, qui est revenu à la charge récemment en ce qui concerne plus précisément la protection des données personnelles recueillies par les gouvernements³²⁴.

Sur la question de la collecte et de l'utilisation de renseignements personnels dans le cadre de transactions commerciales ou d'études de marché, la Commission rappelle avec insistance qu'elles ne doivent pas être faites à l'insu des consommateurs, qui ont le droit d'être au fait de ces pratiques et également de refuser que leurs renseignements personnels soient fichés et utilisés à des fins de marketing ou pour toute autre finalité qu'ils n'entérinent pas³²⁵. **Des lois canadiennes et québécoises existent déjà en matière de protection des renseignements personnels³²⁶ et obligent les organismes publics et privés à donner accès à son dossier d'information à toute personne qui en fait la demande**; le problème réside dans le fait que peu de personnes sont au courant de ces obligations et que, de surcroît, les entreprises et organismes, publics ou privés, qui ne respectent pas les règles établies sont rarement pénalisés. Par souci de transparence et considérant la valeur financière des profils

319. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 53; Fernando GALEMBECK, *op. cit.*, p. 126 des *Actes*.

320. Notamment chez *Amazon.com* qui envoie régulièrement des offres personnalisées à ses clients en s'appuyant sur leurs achats antérieurs.

321. Au Québec, des essais à cet effet sont en cours dans certaines succursales de la Société des alcools, des marchés Métro et des magasins Bureau en gros. Voir PRESSE CANADIENNE, « Bureau en gros fera l'essai du RFID avec Bell », *Direction informatique express*, Le bulletin des actualités technologiques, 1^{er} novembre 2005 [en ligne] <http://www.directioninformatique.com/di/client/ft/DirectionInformatique/Nouvelles.asp?id=37276>

322. THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *op. cit.*, p. 53-54.

323. COMMISSARIAT À LA PROTECTION DE LA VIE PRIVÉE DU CANADA, *Rapport annuel au Parlement 2004*, Rapport concernant la Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques, 2005 [en ligne] http://www.privcom.gc.ca/information/pub/pa_reform_060605_f.asp.

324. COMMISSARIAT À LA PROTECTION DE LA VIE PRIVÉE DU CANADA, « La Commissaire à la protection de la vie privée dépose un rapport et se prononce en faveur d'une réforme urgente de la Loi sur la protection des renseignements personnels du Canada », Communiqué, Ottawa, 5 juin 2006 [en ligne] http://www.privcom.gc.ca/media/nr-c/2006/nr-c_060605_f.asp.

325. En fait, seuls les renseignements nécessaires à l'objet du dossier peuvent être colligés.

326. Pour l'ensemble du Canada : GOUVERNEMENT DU CANADA, *Charte canadienne des droits et libertés* (l'annexe B de la *Loi de 1982 sur le Canada*, 1982, ch. 11 [R.-U.]), *Loi sur la protection des renseignements personnels* (L.R., 85, ch. P-21), *Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques* (C-6); à l'échelle du Québec : GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Charte québécoise des droits et libertés de la personne* (L.R.Q., c. C-12), *Loi concernant le cadre juridique des technologies de l'information* (L.R.Q., c. C-1.1), *Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels* (L.R.Q., c. A-2.1) et *Loi sur la protection des renseignements personnels dans le secteur privé* (L.R.Q., c. P-39.1).

de consommation, les sociétés qui pratiquent ce genre d'activité devraient informer leur clientèle et obtenir le consentement des personnes concernées.

Enfin, l'accès à l'information génétique constitue une autre facette de la protection des renseignements personnels à ne pas négliger. Avec les nanotechnologies, les biopuces à ADN sur silicium ouvrent la voie à l'analyse du contenu génétique des cellules *in situ* – bientôt il sera possible pour un médecin de « lire » le code génétique d'un patient directement dans son bureau de consultation et d'obtenir ainsi quantité de renseignements sur son état de santé et sur sa prédisposition génétique à développer certaines maladies. Une telle information sera aussi accessible aux forces policières et même aux agents de douane à des fins d'identification (et non plus de diagnostic) et selon un encadrement légal bien défini. En 2003, dans le contexte d'un avis sur les banques d'information génétique, la Commission s'est penchée sur l'utilisation de l'information génétique à d'autres fins que médicales, notamment par les assureurs, les employeurs et les institutions financières, une pratique susceptible de favoriser la discrimination dans la prise de décision concernant les personnes visées (clients, employés et emprunteurs, par exemple)³²⁷. **La Commission estime toujours que toute forme d'utilisation de l'information génétique par des tiers autres que les professionnels de la santé et autrement qu'à des fins de traitement devrait être soumise à un débat de société sur ces pratiques et leurs finalités.**

En lien avec la citoyenneté et l'innovation technologique

Pour valider son utilité ou sa pertinence, l'innovation technologique traverse un processus d'assimilation qui aura pour résultat l'acceptation sociale ou le rejet. Ce processus permet normalement au citoyen de se familiariser avec de nouvelles techniques ou de nouveaux produits pour ensuite les intégrer dans ses habitudes de vie. Or, les modes d'assimilation de l'innovation technologique sont empreints d'une subjectivité qui peut sembler

déconcertante. En effet, la consommation est de plus en plus perçue comme un enjeu de pouvoir où les citoyens revendiquent le droit de faire des choix qui reflètent leurs valeurs. Il faut voir dans cet exercice de la citoyenneté un signe de santé de la démocratie, à la condition, cependant, que les citoyens soient conscients de leur potentiel d'influence, qu'ils reconnaissent la responsabilité qui accompagne tout acte décisionnel et, enfin, qu'ils aient accès à une information claire et objective.

L'autonomisation des citoyens – mieux connue sous le terme anglais *empowerment* – est le « processus par lequel une personne, ou un groupe social, acquiert la maîtrise des moyens qui lui permettent de se conscientiser, de renforcer son potentiel et de se transformer dans une perspective de développement, d'amélioration de ses conditions de vie et de son environnement³²⁸ ». Elle se traduit notamment par la volonté de faire des choix qui respectent les valeurs individuelles et sociales de chacun. Dans une société fortement atomisée et où le niveau de confiance envers la classe politique est peu élevé, le citoyen a le sentiment qu'il peut décider lui-même et exercer une influence quand il s'agit de ses choix de vie et de consommation, des choix qui sont perpétuellement à refaire.

Lorsqu'il est question de la façon dont se comporteront les marchés et les citoyens face aux produits issus de l'innovation nanotechnologique, le sort réservé aux aliments modifiés génétiquement est encore une fois l'exemple qui est évoqué. Le sociologue Michael D. Mehta note au sujet des OGM que « les organismes de réglementation canadiens empêchent l'étiquetage qui donnerait la possibilité au consommateur de faire la distinction entre des aliments qui ont été approuvés en fonction du processus de fabrication plutôt que selon la nature du produit. En réalité, bien des consommateurs jugent à la fois le processus et le produit comme des facteurs déterminants dans les choix qu'ils font. La leçon qui se dégage pour les nouvelles technologies comme pour les nanotechnologies est que l'étiquetage sera vraisemblablement un cauchemar en termes de relations publiques et de processus de réglementation. Il y a de

327. COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique...*, op. cit., p. 51-52. La Commission avait d'ailleurs émis la recommandation suivante : « que le gouvernement du Québec, considérant les possibilités accrues qu'offrent les nanotechnologies dans la collecte d'information génétique, demande aux employeurs, aux assureurs et aux institutions financières de se doter, d'ici cinq ans, d'une politique d'autorégulation relative à l'utilisation de l'information génétique dans le cadre de leurs évaluations. Si les politiques proposées ne sont pas satisfaisantes au regard des valeurs sociétales, le gouvernement devra légiférer de façon à encadrer et à restreindre l'utilisation de l'information génétique dans des domaines autres que celui de la santé. »

328. OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique*, op. cit.

fortes chances que les débats sur l'étiquetage obligatoire ou volontaire ainsi que sur une évaluation fondée sur le processus ou sur le produit adviennent lorsque les consommateurs seront exposés à un plus grand nombre de produits issus des nanotechnologies³²⁹. »

Dans l'éventualité où cette hypothèse se réaliserait, les acteurs engagés dans le développement des nanotechnologies (chercheurs, promoteurs, investisseurs, gouvernements et groupes d'intérêts) auraient tout avantage à se concerter sur la façon de faciliter le processus d'intégration des innovations nanotechnologiques. L'étiquetage des produits issus des nanotechnologies devrait-il alors être envisagé? Pour le moment, la Commission croit qu'il ne servirait à rien d'aller de l'avant avec l'étiquetage de produits issus des nanotechnologies ou dotés de composants nanométriques tant que ces produits ne seront pas mieux caractérisés et que leurs effets ne seront pas mieux connus, mais aussi tant que la population n'aura pas été mieux informée à leur sujet.

Une information claire et accessible est un préalable à l'autonomisation du citoyen, mais elle représente parallèlement un défi de taille. Comment rejoindre la population? Comment s'assurer que l'information véhiculée est exacte, exempte de jugements de valeur et qu'elle répond aux interrogations de la société? Dans le cas des nanotechnologies, il s'agit d'une entreprise qui comporte énormément de défis, en raison de la complexité de ces technologies et de la diversité des possibilités d'application. Néanmoins, il faudra que les groupes concernés s'y astreignent afin d'éviter une répétition de ce qui s'est produit avec les organismes génétiquement modifiés, l'exemple patent d'une politique publique mal gérée, au dire de certains³³⁰. **La Commission rappelle l'importance de transmettre une information appropriée à la population et de**

favoriser sa participation dans la prise de décisions au sujet des nanotechnologies. S'appuyant sur des données techniques solides concernant les impacts potentiels des nanoparticules sur la santé et l'environnement, de même que sur un dialogue ouvert avec toutes les parties prenantes au sujet des répercussions sociales et éthiques potentielles, la nanotechnologie pourrait éviter une trajectoire semblable à celle des OGM³³¹.

Comme l'observent Einsiedel et Goldenberg, la sensibilisation du public ainsi que les initiatives d'éducation publique sont des mécanismes importants, mais qui sont voués à l'échec lorsque leur seule intention est de susciter l'acceptation de la population. Ce qui importe aux yeux du public, plus que les subtilités de la science et de la technologie, c'est la raison d'être d'une application, comment et dans quelles conditions elle sera utilisée, comment seront gérés les risques et les bénéfices qui en découlent³³². L'étude des rapports entre les citoyens et l'innovation permettrait de comprendre plus facilement le processus d'assimilation des produits issus des nouvelles technologies.

En se dotant d'un portail Internet d'information sur les organismes génétiquement modifiés³³³, le gouvernement du Québec a entrepris une démarche louable pour informer la population de la façon la plus objective possible en s'associant, notamment, à des partenaires comme l'Office de protection du consommateur, les ministères concernés en matière de santé, d'environnement et d'agriculture, ainsi que la Commission de l'éthique de la science et de la technologie. Une telle démarche serait tout aussi appropriée pour les nanotechnologies, d'autant plus qu'elle s'inscrirait relativement tôt dans le processus d'innovation nanotechnologique et qu'elle pourrait en accompagner le développement au fil des ans.

329. (Traduction libre) Michael D. MEHTA, *op. cit.*, p. 37.

330. Kristen KULINOWSKI, « Nanotechnology: From "Wow" to "Yuck"? », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004, p. 19 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/cgi/content/short/24/1/13>.

331. *Ibid.*

332. Edna F. EINSIEDEL et Linda GOLDENBERG, *op. cit.*, p. 31. Voir aussi Claire MARRIS, coauteure du rapport PABE [Public Perceptions of Agricultural Biotechnologies in Europe]: « Public Views on GMOs: Deconstructing the Myths », *EMBO Reports*, vol. 2, n° 7, juillet 2001 [en ligne] <http://www.emboreports.org>. Les points saillants de cet article sont présentés dans l'avis de la Commission sur les OGM à la page 82 et peuvent s'appliquer aux nanotechnologies.

333. Voir <http://www.ogm.gouv.qc.ca/>.

Recommandation n° 8

La Commission recommande :

que le gouvernement du Québec s'inspire des travaux réalisés pour la mise en place d'un portail Internet sur les organismes génétiquement modifiés afin de créer un portail d'information sur les nanotechnologies à l'intention de la population.

Même si l'information est disponible et facilement accessible, il faut s'assurer que les citoyens sont sensibilisés à la question des nouvelles technologies et qu'ils en comprennent les tenants et aboutissants; c'est une responsabilité qui leur incombe, mais dont ils ne mesurent pas toujours l'importance. Considérant,

premièrement, une diminution de l'intérêt des jeunes pour une formation en science et technologie, alors que la consommation de produits technologiques ne cesse d'augmenter; considérant, deuxièmement, que les nanotechnologies permettront de créer des produits inédits dont on ne maîtrise pas nécessairement tous les aspects; considérant, troisièmement, que la convergence des sciences amplifie la puissance de traitement de données et la possibilité d'envahir la vie privée des gens, **il devient urgent de se pencher sur des mécanismes de rapprochement avec la population qui aideraient à pallier un manque d'information relativement neutre et objective sur l'innovation technologique.**

Conclusion

C'est avec beaucoup de curiosité et d'intérêt que la Commission a amorcé sa réflexion sur les enjeux éthiques soulevés par le développement des nanotechnologies. D'une part, parce que le domaine est encore peu connu ; d'autre part, parce que le potentiel de développement et d'utilisation de la matière à l'échelle nanométrique semble à l'heure actuelle sans limite. Il est d'ailleurs facile de s'émerveiller, voire de se laisser emporter par l'euphorie et l'enthousiasme qui animent une bonne partie des acteurs du domaine.

Au fil de sa réflexion, la Commission a constaté l'ampleur et la complexité de la tâche qu'elle s'était elle-même assignée, c'est-à-dire de documenter le développement de la nanoscience et des nanotechnologies afin de cerner les enjeux éthiques qui accompagnent leur émergence. En effet, les nanotechnologies touchent tous les domaines, avec une diversité d'applications et des potentiels d'utilisation très différents. De plus, la réflexion entourant les nanotechnologies est complexifiée du fait que la matière nanométrique est invisible à l'œil nu ; leurs effets, positifs ou négatifs, seront cependant bien tangibles. Enfin, le fait qu'il s'agisse de technologies en émergence signifie également qu'il est aujourd'hui impossible de prévoir toutes les applications qui verront le jour et quelles pourraient être leurs répercussions sur le Québec et sur le reste du monde. Pour illustrer ce propos, la Commission dresse un parallèle avec l'émergence de l'Internet, qui a révolutionné les façons de communiquer et bouleversé les modes de vie. Qui aurait pu prédire une telle pénétration culturelle lorsque cette technologie fut développée par un professeur d'informatique, avec des subventions du département de la Défense américain, il y a plus de trente ans ? Il en va de même pour le sujet traité dans le présent avis.

Les nanotechnologies émergent de la convergence des sciences, un phénomène relativement récent en soi. Les connaissances requises pour appréhender les défis qui se manifesteront sont donc très diversifiées : chimie, biologie, physique, informatique, en ce qui concerne la science elle-même, mais également philosophie, sociologie et droit en ce qui a trait aux impacts de son développement sur les sociétés contemporaines. L'un des écueils qui guettent les nanotechnologies et qui pourraient influencer leurs effets éventuels sur la société est donc la spécialisation des individus, dans des domaines très poussés, qui risque de voiler en quelque sorte le tableau général du développement qu'entraîneront ces nouvelles technologies ainsi que le questionnement qui devrait y être associé³³⁴. Une compréhension poussée de la science mais également une compréhension générale – donc plus globale – sont nécessaires afin de maîtriser le développement des technologies de la convergence, auxquelles participent les nanotechnologies.

La Commission estime qu'il ne faut pas minimiser l'impact potentiel des nanotechnologies et qu'il faut donc agir avec précaution afin d'implanter les mesures d'encadrement nécessaires à la gestion responsable du domaine. En soutien à cette assertion, la Commission a présenté des exemples d'applications, dans les domaines de la santé, de l'environnement ou de la sécurité, qui poursuivent des objectifs louables, mais qui pourraient également avoir des répercussions indirectes néfastes. De plus, elle a répertorié quelques exemples qui montrent comment une utilisation pacifique des nanotechnologies pourrait être détournée de son sens original et poursuivre des fins non pas altruistes ou de protection, mais plutôt d'agression, potentiellement dangereuses pour

334. Willem H. VANDERBURG, « Some Reflections on Teaching Biotechnology, Nanotechnology, and Information Technology », éditorial, *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004, p. 7.

l'humanité. Les possibilités de modifier le comportement humain, de surveiller des personnes à leur insu ou, encore, de relâcher dans l'environnement des substances nocives sont des exemples qui portent à réfléchir et qui doivent inciter les divers acteurs engagés dans la promotion et la production de nanotechnologies à agir de façon responsable et transparente.

Néanmoins, il ne faudrait surtout pas croire à un scénario sombre et catastrophique à l'aube du développement nanotechnologique. L'appréhension pourrait avoir pour effet de tuer dans l'œuf des technologies susceptibles d'offrir un potentiel d'applications extrêmement positif – si elles sont utilisées à bon escient. Améliorer la santé humaine grâce à la détection précoce de maladies et à la thérapie ciblée, restaurer des habitats qui pâtissent des effets de l'action humaine, utiliser de façon plus efficiente les ressources disponibles, voilà quelques exemples d'actions positives qui deviennent possibles notamment grâce au développement des nanotechnologies. Les divers acteurs concernés doivent cependant être prêts à discuter des objectifs poursuivis et des actions à entreprendre afin d'y parvenir, car c'est souvent la collectivité dans son ensemble qui supporte les coûts des répercussions.

Enfin, la Commission sort de cet exercice avec une certitude – celle que la réflexion sur les enjeux éthiques et sociaux des technologies s'amorce à peine et qu'il faudra continuer à réfléchir, discuter, émettre des opinions sur les nanotechnologies et sur la manière d'assurer leur développement harmonieux. C'est pour cette raison qu'elle demeure ouverte à l'idée de poursuivre sa réflexion sur des questions plus précises que l'État pourrait se poser en ce qui concerne la gestion responsable des nanotechnologies, au fur et à mesure des orientations ou des décisions qu'il aura à prendre en la matière dans l'avenir.

Glossaire*

activation de médicaments – opération par laquelle on permet au principe actif contenu dans des médicaments de se libérer au moment voulu et d’entrer en action dans un organe, un tissu ou une cellule. Syn.: activation de médicament, activation. (*drug activation*)

approche ascendante – méthode de fabrication de composants nanométriques, qui consiste à les assembler à partir des éléments de base de la matière, atome par atome ou molécule par molécule, jusqu’à ce qu’on obtienne une structure complète capable de s’intégrer dans un ensemble plus grand. Syn.: voie ascendante, démarche ascendante, approche vers le haut, approche par le bas, approche de bas en haut. (*bottom-up, bottom-up approach, bottom up approach*)

approche descendante – méthode de fabrication de composants nanométriques, qui consiste à réduire progressivement la taille d’un matériau existant, en le découpant ou le sculptant, jusqu’à ce qu’il possède les dimensions et les caractéristiques voulues. Syn.: voie descendante, démarche descendante, approche vers le bas, approche par le haut, approche de haut en bas. (*top-down, top-down approach, top down approach*)

assemblage positionnel – technique d’assemblage de structures moléculaires, dans laquelle les atomes et les molécules sont placés progressivement, selon un processus déterminé à l’avance, dans la position qu’ils doivent occuper pour former l’ensemble souhaité. (*positional assembly, positional synthesis*)

autoassemblage – technique d’assemblage dans laquelle, lorsqu’on les place dans des conditions particulières, des atomes et des molécules se réunissent spontanément pour former une structure, sans intervention extérieure. (*self-assembly*)

autonomisation – processus par lequel une personne, ou un groupe social, acquiert la maîtrise des moyens qui lui permettent de se conscientiser, de renforcer son potentiel et de se transformer dans une perspective de développement, d’amélioration de ses conditions de vie et de son environnement. (*empowerment*)

auto-organisation – processus par lequel, lorsqu’on les place dans certaines conditions particulières, les atomes et les molécules d’une structure s’organisent différemment entre eux, sans aucune intervention extérieure, pour créer spontanément un nouvel arrangement aux propriétés uniques. (*self-organization*)

autoréplication – processus par lequel une nanomachine ou un nanorobot produit des copies d’elle-même ou de lui-même, en se servant des matériaux présents dans son environnement. Syn.: autoreproduction. (*self-replication*)

barrière hématoencéphalique – ensemble des mécanismes physiologiques destinés à empêcher certaines substances contenues dans le sang de passer librement dans le liquide céphalorachidien et dans les cellules du système nerveux central. Syn.: barrière hématoméningée, barrière sang-cerveau, BSC. (*blood-brain barrier*)

biocapteur – capteur assurant la transformation d’un phénomène biologique en un signal électrique susceptible d’être analysé et permettant la détection ou le dosage direct d’une espèce biologique. Syn.: biodétecteur. (*biosensor*)

biopuce – petite plaque en verre, en silicium ou en plastique, sur laquelle sont déposées des molécules organiques servant à exécuter une ou des tâches liées le plus souvent à l’analyse ou à la détection d’autres molécules. Syn.: puce biologique. (*biochip, biological chip*)

* Sauf indication contraire, les définitions du glossaire sont celles du *Grand dictionnaire terminologique* de l’Office québécois de la langue française (OQLF) – voir les sites <http://www.oqlf.gouv.qc.ca> ou <http://www.granddictionnaire.com> pour des informations plus détaillées sur ces termes et sur d’autres termes relatifs aux nanotechnologies; en collaboration avec l’OQLF, NanoQuébec présente également sur son site un glossaire des nanotechnologies – <http://www.nanoquebec.ca>. Dans le présent avis, certains termes qui ne relèvent pas du domaine des nanotechnologies ont été ajoutés au glossaire pour faciliter la compréhension du texte.

buckminsterfullerène – fullerène qui est composé de 60 atomes de carbone regroupés dans une structure stable comportant 12 pentagones et 20 hexagones et dont la forme sphérique est semblable à celle d'un ballon de soccer. Syn.: fullerène de Buckminster, fullerène C_{60} , molécule de carbone C_{60} , molécule de C_{60} . (*buckminsterfullerene*, *bucky ball*, *buckyball*, C_{60} *fullerene*, C_{60} *molecule*, *fullerene-60*)

capteur – élément d'un appareil mesureur servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. (*sensor*)

caractérisation – processus analytique qui vise à décrire les propriétés caractéristiques d'une matière ou les traits distinctifs d'un phénomène. (*characterization*)

cancérogénicité – propriété d'une substance qui peut provoquer le cancer. Syn.: carcinogénicité, pouvoir cancérogène, pouvoir cancérogène. (*carcinogenicity*)

carcinogénicité – voir cancérogénicité.

convergence – processus par lequel des disciplines scientifiques autrefois séparées se rapprochent et s'unissent progressivement pour créer une synergie dont l'un des principaux effets est de permettre parallèlement l'unification de plusieurs technologies issues de leurs différentes applications. (*convergence*)

cycle de vie – période qui comprend toutes les étapes de la vie d'un produit, depuis sa conception et sa fabrication jusqu'à son déclin, y compris son retrait du marché, son élimination et son rejet dans l'environnement. Syn.: cycle de vie d'un produit, CVP. (*product life cycle*)

drone – petit avion sans pilote, généralement commandé à distance par ondes radioélectriques, qui est semi-autonome ou autonome, lorsqu'il est programmé pour exécuter différentes tâches ou qu'il possède l'équipement électronique nécessaire pour se guider lui-même, et qu'on utilise pour effectuer des missions diverses. (*drone*)

échelle nanométrique – échelle de mesure comprise entre 1 et 100 nanomètres, qui est utilisée pour calculer les dimensions de structures extrêmement petites qu'on trouve au niveau moléculaire. Syn.: échelle nanoscopique, nanoéchelle. (*nanometer scale*, *nanoscale*, *nanoscopic scale*, *nanometric scale*)

écophagie globale – selon un scénario catastrophique imaginé par certains spécialistes de la nanotechnologie, processus par lequel des nanorobots s'autoreproduisant sans contrôle pourraient détruire tous les écosystèmes de la Terre, en transformant en une masse informe tous les matériaux qu'ils rencontrent. Syn.: écophagie, problème de la gelée grise, problème de la matière visqueuse grise, problème de la substance visqueuse grise, problème de la masse grise. (*global ecophagy*, *ecophagy*, *gray goo problem*, *grey goo problem*)

effet quantique – phénomène particulier qui se produit ou propriété unique qu'acquiert une structure de la matière, lorsqu'on passe progressivement de l'échelle macroscopique à l'échelle des atomes et des molécules, où les lois de la physique quantique prédominent. (*quantum effect*)

effet tunnel – phénomène quantique qui se produit lorsqu'une particule de matière, comme un électron, traverse une zone d'énergie qui lui est contraire, même si elle ne possède pas, selon les lois de la physique classique, l'énergie suffisante pour franchir la barrière devant laquelle elle se trouve. (*tunnel effect*, *tunneling effect*, *tunnelling effect*, *tunneling*, *tunnelling*, *quantum tunneling*, *quantum tunnelling*)

électronique moléculaire – domaine de l'électronique qui concerne l'étude, la conception, la fabrication et l'utilisation de circuits ou de composants électroniques, qu'on assemble à partir de molécules chimiques ou biologiques dont on veut exploiter la petite taille et les propriétés conductrices. (*molecular electronics*, *moletronics*, *moletronics*)

embryotoxicité – caractère d'un médicament ou d'une substance chimique qui entraîne des effets nocifs sur le développement de l'embryon. Syn.: toxicité embryonnaire. (*embryotoxicity*)

endoscopie – méthode d'exploration, à des fins diagnostiques ou thérapeutiques, de la surface interne d'un organe creux, d'une cavité naturelle ou d'un conduit du corps accessible par les voies naturelles qui se pratique à l'aide d'un endoscope. (*endoscopy*)

eugénique – science qui étudie et cherche à mettre en œuvre les conditions les plus favorables à l'amélioration du patrimoine héréditaire des populations humaines, notamment dans le but d'éliminer les maladies héréditaires. Syn.: eugénisme. (*eugenics*)

fossé nanotechnologique – écart qui devrait se créer, dans un avenir rapproché, entre des groupes de personnes, des sociétés, des pays ou des ensembles géographiques, quant à l'acquisition des connaissances et à l'utilisation de nouvelles techniques, dans des domaines liés au développement des nanosciences et des nanotechnologies. (*nano-divide*)

fullerène – molécule en forme de cage fermée, composée d'atomes de carbone qui sont regroupés au sein d'une structure constituée de pentagones et d'hexagones. (*fullerene*)

gelée grise – masse informe de matériaux, imaginée par certains spécialistes de la nanotechnologie, qui résulterait de l'autoreproduction incontrôlée de nanorobots s'accaparant, transformant et détruisant les ressources des écosystèmes. Syn.: matière visqueuse grise, substance visqueuse grise, masse grise. (*gray goo, grey goo*)

gelée verte – prolifération d'organismes nuisibles s'auto-répliquant ou ensemble de perturbations biologiques que pourraient engendrer, selon certains spécialistes des nanobiotechnologies, accidentellement ou en fonction d'intentions malveillantes, des nanorobots hybrides fabriqués à partir d'organismes vivants et de matériaux non organiques. (*green goo*)

génie biomédical – ensemble des personnes et des activités intellectuelles ou techniques (utilisant la mécanique, l'électronique, etc.) qui contribuent à l'élaboration, à la construction et à l'entretien d'appareils utilisés pour le diagnostic médical, les thérapeutiques ou les organes et les systèmes artificiels. (*biomedical engineering*)

hydrure métallique – composé chimique résultant de la combinaison de l'hydrogène à l'état gazeux avec un métal comme l'aluminium ou le lithium. Syn.: hydrure interstitiel. (*metal hydride*)

imagerie par résonance magnétique (IRM) – méthode d'imagerie médicale basée sur le phénomène de la résonance magnétique, qui permet d'obtenir des images tomographiques de la distribution d'éléments atomiques tels que l'hydrogène. Syn.: tomographie à résonance magnétique, tomographie par résonance magnétique, zeugmatographie. (*magnetic resonance imaging*)

imagerie biologique – ensemble des techniques liées à l'étude des organismes vivants, qui permettent de visualiser des molécules, des cellules ou des processus biologiques, à l'aide de différents rayonnements produits par des ondes électromagnétiques ou des ondes sonores. Syn.: bio-imagerie. (*biological imaging, bioimaging*)

ingénierie tissulaire – ensemble de techniques qui font appel aux principes et aux méthodes de l'ingénierie et des sciences de la vie pour comprendre les relations entre structures et fonctions des tissus normaux et pathologiques de mammifères, et pour développer des substituts biologiques pouvant restaurer, maintenir ou améliorer les fonctions des tissus. Syn.: génie tissulaire, organogénèse. (*tissue engineering*)

intelligent – se dit de tout appareil, de toute machine, de tout système, de tout dispositif ou de tout objet qui possède les ressources électroniques ou informatiques nécessaires pour traiter, de manière autonome, des données recueillies par ses propres moyens ou qui lui ont été transmises, et pour utiliser l'information afin de commander des actions. (*smart*)

laboratoire sur puce – système miniaturisé d'analyse biologique ou chimique, qui est constitué d'une minuscule plaque de verre, de plastique ou de silicium, sur laquelle sont gravés de multiples canaux qui amènent mécaniquement les liquides d'un prélèvement jusqu'à différents réservoirs aménagés pour l'analyse des molécules. Syn.: laboratoire sur une puce, labopuce, puce microfluidique. (*lab-on-a-chip [LOC], lab-on-chip, laboratory-on-a-chip, laboratory-on-chip, microfluidic chip, micro-total analysis system, micro-TAS, μ TAS*)

lithographie – ensemble des techniques qui permettent de reproduire, dans une résine déposée à la surface d'un matériau, le motif d'une structure qu'on désire fabriquer. (*lithography*)

lithographie par ultraviolets extrêmes – technique de lithographie dans laquelle on utilise des rayons électromagnétiques, d'une longueur d'onde pouvant varier entre 10 et 14 nanomètres, pour reproduire le motif d'une structure nanométrique dans une résine sensible, vers laquelle ils sont dirigés à travers un masque par un système de miroirs. Syn.: lithographie aux ultraviolets extrêmes, lithographie ultraviolet extrême, lithographie UV extrême, lithographie EUV, lithographie par rayons X mous. (*extreme ultraviolet lithography, extreme UV lithography, EUV lithography, soft X-ray lithography*)

lithographie par projection de faisceau d'électrons – technique de lithographie dans laquelle un faisceau d'électrons, généralement dirigé par un système de lentilles électromagnétiques, est projeté, à travers un masque de type stencil, en direction de la résine sensible dans laquelle doit être reproduit le motif d'une structure micrométrique ou nanométrique. Syn.: lithographie par projection de faisceau électronique, lithographie par projection électronique, lithographie électronique de projection. (*electron beam projection lithography, electron projection lithography [EPL], projection electron lithography*)

lithographie par rayons X – technique de lithographie dans laquelle on utilise des rayons X, d'une longueur d'onde pouvant varier entre 0,5 et 5 nanomètres, pour reproduire le motif d'une structure nanométrique dans une résine sensible, vers laquelle ils sont dirigés à travers un masque. Syn.: lithographie aux rayons X, lithographie à rayons X, lithographie X. (*X-ray lithography [XRL], X-lithography*)

lixivable – se dit d'une matière dont on peut extraire un ou plusieurs constituants solubles à l'aide d'un solvant. (*leachable*)

loi de Moore – observation selon laquelle le nombre de transistors que peut comporter une puce de silicium double tous les dix-huit mois, augmentant ainsi dans la même proportion la capacité de traitement du microprocesseur qu'elle supporte. (*Moore's law*)

matériau nanocomposite – matériau qui comporte deux ou plusieurs phases* distinctes, dont une au moins intègre des éléments qui possèdent une dimension pouvant varier entre 1 et 100 nanomètres. Syn.: nanocomposite. (*nanocomposite material, nanocomposite, NC*)

matériau nanostructuré – matériau dont la structure comporte au moins une dimension à l'échelle nanométrique, laquelle peut varier entre 1 et 100 nanomètres. (*nanostuctured material, nanostructure material*)

micromètre (µm) – unité de mesure de longueur du système international (SI), qui correspond à un millionième de mètre, c'est-à-dire 10^{-6} mètre. (*micrometer*)

microscope à effet tunnel – microscope en champ proche qui permet, à l'échelle des atomes et des molécules, d'obtenir l'image d'un échantillon, en balayant sa surface à l'aide d'une sonde qui, placée à quelques

nanomètres de celle-ci, crée un faisceau d'électrons par effet tunnel, lequel sert d'instrument de mesure des variations dimensionnelles de la structure ou permet de manipuler les particules de matière. Syn.: microscope électronique à effet tunnel, microscope à balayage à effet tunnel. (*scanning tunneling microscope*)

microscope à force atomique – microscope en champ proche qui permet, à l'échelle des atomes et des molécules, d'obtenir l'image d'un échantillon, en balayant sa surface à l'aide d'une sonde qui, placée à quelques nanomètres de celle-ci, capte les forces répulsives ou attractives des électrons, afin de mesurer les variations dimensionnelles de la structure ou pour manipuler les particules de matière. (*atomic force microscope*)

microscope en champ proche – microscope qui permet de détecter une grandeur physique, à l'échelle des atomes et des molécules, en balayant, à l'aide d'une sonde, la surface d'un échantillon, à quelques nanomètres de celle-ci, afin d'en dresser, en utilisant l'ordinateur, une cartographie dans laquelle les données apparaissent sous forme d'images numérisées. Syn.: microscope de champ proche, microscope à champ proche, microscope à sonde locale. (*scanning probe microscope*)

microscopie en champ proche (SPM) – technique de détection d'une grandeur physique, à l'échelle des atomes et des molécules, qui consiste à balayer, à l'aide d'une sonde, la surface d'un échantillon, à quelques nanomètres de celle-ci, afin d'en dresser, en utilisant l'ordinateur, une cartographie dans laquelle les informations apparaissent sous forme d'images numérisées. Syn.: microscopie de champ proche, microscopie à champ proche, microscopie à sonde locale. (*scanning probe microscopy*)

microscopie à effet tunnel (STM) – microscopie en champ proche* dans laquelle, à l'échelle des atomes et des molécules, on obtient l'image d'un échantillon, en balayant sa surface à l'aide d'une sonde qui, placée à quelques nanomètres de celle-ci, crée un faisceau d'électrons par effet tunnel, lequel sert d'instrument de mesure des variations dimensionnelles de la structure ou permet de manipuler les particules de matière. Syn.: microscopie électronique à effet tunnel, microscopie à balayage à effet tunnel, microscopie par effet tunnel. (*scanning tunneling microscopy, scanning tunnelling microscopy, scanning tunneling electron microscopy, scanning tunnelling electron microscopy*)

microscopie à force atomique (AFM) – microscopie en champ proche dans laquelle, à l'échelle des atomes et des molécules, on obtient l'image d'un échantillon, en balayant sa surface à l'aide d'une sonde qui, placée à quelques nanomètres de celle-ci, capte les forces répulsives ou attractives des électrons afin de mesurer les variations dimensionnelles de la structure ou pour manipuler les particules de matière. (*atomic force microscopy [AFM], scanning force microscopy [SFM]*)

microscopie à force magnétique – microscopie en champ proche dans laquelle on utilise une sonde recouverte d'un matériau magnétique, pour balayer la surface magnétisée d'un échantillon, à quelques nanomètres de celle-ci, afin d'obtenir de l'objet analysé une image, à partir des variations du champ magnétique créé entre les éléments en présence, que cette sonde enregistre en se déplaçant et qui correspondent à des variations de structure. (*magnetic force microscopy*)

mucoviscidose – maladie héréditaire à transmission autosomique récessive, caractérisée par l'hypersécrétion d'un mucus très visqueux qui bloque les conduits des organes atteints pouvant prédisposer le sujet à des infections respiratoires mortelles. Syn.: fibrose kystique (au Québec). (*mucoviscidosis*)

mutagénicité – aptitude d'un agent biologique, physique ou chimique à provoquer des mutations au sein du matériel génétique des cellules. Syn.: pouvoir mutagène. (*mutagenicity*)

nanobiologie – domaine relevant à la fois de la biologie et de la nanoscience, qui étudie le comportement des éléments qui, à l'échelle nanométrique, entrent dans la composition des organismes vivants, et qui s'efforce d'utiliser ces organismes ou d'imiter leur fonctionnement pour fabriquer des matériaux ou des dispositifs nouveaux aux propriétés particulières. Syn.: nanobioscience, bionanoscience. (*nanobiology, nanobioscience, bionanoscience*)

nanobiotechnologie – domaine dans lequel on utilise les techniques de la nanotechnologie pour développer des outils permettant de manipuler ou d'étudier des organismes vivants, ou dans lequel on se sert de ces organismes ou on s'inspire simplement des mécanismes de leur fonctionnement pour fabriquer, à l'échelle nanométrique, des matériaux ou des dispositifs nouveaux aux propriétés particulières. (*nanobiotechnology*)

nanocouche – couche mince, d'une épaisseur mesurant moins de 100 nanomètres, qui permet, principalement à cause de sa taille, d'apporter des propriétés particulières au matériau sur lequel elle est déposée ou au sein duquel elle est intégrée. Syn.: couche nanométrique, couche ultramince, nanofilm, film nanométrique, film ultramince. (*nanofilm*)

nanocristal fluorescent – cristal aux dimensions nanométriques, fait d'un ou de plusieurs matériaux semi-conducteurs, qui, lorsqu'il est excité par un rayonnement ultraviolet, émet des ondes lumineuses dont la longueur, à laquelle correspond une couleur du spectre, est déterminée par sa taille. Syn.: nanocristal semi-conducteur fluorescent, nanocristal luminescent, nanocristal semi-conducteur luminescent. (*fluorescent nanocrystal*)

nanoélectronique – domaine issu principalement des recherches en nanotechnologie et en électronique, qui concerne l'étude, la conception, la fabrication et l'utilisation de circuits ou de composants électroniques, qu'on assemble à partir d'éléments dont les dimensions se situent à l'échelle nanométrique, au niveau des atomes et des molécules, et dont on veut exploiter les propriétés physiques particulières. (*nanoelectronics*)

nanofabrication – fabrication de structures qui comportent au moins un élément dont les dimensions se situent à l'échelle nanométrique, entre 1 et 100 nanomètres. (*nanofabrication*)

nanofil – fil le plus souvent en métal ou en céramique, dont le diamètre ou la largeur ne dépasse pas quelques dizaines de nanomètres. Syn.: fil nanométrique. (*nanowire*)

nanolithographie – ensemble des techniques qui, à l'échelle nanométrique, permettent de reproduire à la surface d'un matériau le motif d'une structure moléculaire. Syn.: lithographie à l'échelle nanométrique. (*nanolithography, nanoscale lithography*)

nanomachine – assemblage de molécules dans lequel certains éléments aux dimensions nanométriques sont mis en mouvement, dès qu'ils reçoivent un signal extérieur. (*nanomachine*)

nanomatériau – matériau constitué de particules dont la taille comporte au moins une dimension qui peut varier entre 1 et 100 nanomètres et qui lui permet d'acquérir des propriétés particulières. (*nanomaterial*)

nanomatériaux – domaine de la nanotechnologie qui concerne l'étude et la fabrication de matériaux constitués de particules dont la taille comporte au moins une dimension qui peut varier entre 1 et 100 nanomètres et qui leur permet d'acquérir des propriétés particulières. (*nanomaterials*)

nanomètre (nm) – unité de mesure de longueur du système international (SI) valant 10^{-9} mètre, soit un milliardième de mètre. (*nanometer*)

nanométrie – domaine de la métrologie dans lequel on étudie les mesures liées aux structures nanométriques ou aux phénomènes physiques qui peuvent se produire à l'échelle nanométrique, et qui traite également des appareils de mesure utilisés pour l'évaluation des grandeurs. (*nanometrology*)

nano-objet – assemblage d'atomes ou de molécules, dont au moins une dimension est inférieure à 100 nanomètres, qui forme une unité aux propriétés bien définies que l'on peut exploiter pour un usage spécifique. Syn.: objet nanométrique. (*nano-object*)

nanoparticule – particule de matière formée d'atomes et de molécules, qui comporte une ou plusieurs dimensions pouvant mesurer entre 1 et 100 nanomètres et qui possède des propriétés physicochimiques particulières. (*nanoparticle, nanometric particle, nanosize particle, nanosized particle, nanoscale particle*)

nanoparticule de synthèse – nanoparticule fabriquée volontairement en laboratoire ou en entreprise (nanotubes de carbone, fullerènes, nanocristaux, etc.) (CEST, d'après OQLF). (*engineered nanoparticle*)

nanoparticule naturelle – nanoparticule issue d'un processus d'origine naturelle (cendres volcaniques, incendies de forêt, etc.) (CEST, d'après OQLF). (*natural nanoparticle*)

nanoparticule résiduelle – nanoparticule issue involontairement d'un processus d'origine humaine généralement associé à la pollution, comme des feux de cheminée, de la combustion des moteurs à essence, du travail des métaux, de produits biodégradables (CEST, d'après OQLF). (*incidental nanoparticle*)

nanoperle de carbone – composé de carbone comportant dans sa structure des éléments amorphes et cristallins de taille nanométrique, qui prend la forme d'une sphère dont le diamètre peut varier entre une et quelques centaines de nanomètres, laquelle s'associe à d'autres sphères semblables pour créer des chapelets dont l'enchevêtrement forme une mousse tridimensionnelle, l'ensemble ayant la propriété de produire un champ électrique capable d'engendrer une source stable d'électrons. Syn.: nanoperle. (*carbon nanopearl, nanopearl, carbon nanobead, nanobead*)

nanopoudre – poudre composée de nanoparticules dont le diamètre est inférieur à 100 nanomètres et qui sont généralement constituées de métal, d'alliage, de céramique ou de composite. Syn.: poudre nanométrique. (*nanopowder, nanometric powder, nanosize powder, nanosized power, nanoscale powder*)

nanorobot – nanomachine fabriquée dans le but d'effectuer avec précision une tâche spécifique ou un ensemble de tâches répétitives. Syn.: nanobot. (*nanorobot, nanobot, nanoscale robot*)

nanoscience – étude scientifique, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures moléculaires dont au moins une de leurs dimensions mesure entre 1 et 100 nanomètres, dans le but de comprendre leurs propriétés physicochimiques particulières et de définir les moyens qu'on peut utiliser pour les fabriquer, les manipuler et les contrôler. (*nanoscience*)

nanostructuré – dont la structure comporte au moins une dimension à l'échelle nanométrique, laquelle peut varier entre 1 et 100 nanomètres. (*nanostructured*)

nanotechnologie – domaine multidisciplinaire qui concerne la conception et la fabrication, à l'échelle des atomes et des molécules, de structures moléculaires qui comportent au moins une dimension mesurant entre 1 et 100 nanomètres, qui possèdent des propriétés physicochimiques particulières exploitables, et qui peuvent faire l'objet de manipulations et d'opérations de contrôle. (*nanotechnology*)

nanotechnologie moléculaire – fabrication mécanique et contrôlée de structures moléculaires, par une approche ascendante qui consiste à les assembler, étape par étape, molécule par molécule, en se servant d'appareils spécialisés capables de provoquer des réactions chimiques et des phénomènes physiques à l'échelle nanométrique. Syn.: fabrication moléculaire, ingénierie moléculaire. (*molecular nanotechnology, molecular manufacturing, nanomanufacturing, molecular engineering*)

nanotube – structure moléculaire en forme de cylindre creux et fermé dont le diamètre ne mesure que quelques nanomètres. (*nanotube*)

nanotube de carbone à paroi simple – nanotube constitué d'un seul feuillet d'atomes de carbone enroulé sur lui-même. Syn.: nanotube monofeuillet, nanotube de carbone monoparoi, nanotube monoparoi, nanotube à paroi simple. (*single-walled carbon nanotube*)

nanotube de carbone à parois multiples – nanotube constitué de plusieurs feuillets d'atomes de carbone enroulés sur eux-mêmes pour former des cylindres concentriques. Syn.: nanotube multifeuillet, nanotube de carbone multiparoi, nanotube multiparoi. (*multi-walled carbon nanotube*)

nanotube de carbone – feuillet de carbone enroulé sur lui-même et généralement fermé à chaque bout par une moitié de molécule de fullerène, de manière à former un tube de quelques nanomètres de diamètre et de 10 à 100 micromètres de longueur. (*carbon nanotube, buckeytube, buckeytube*)

neuroprothèse – appareil destiné à rétablir une connexion nerveuse, liée le plus souvent à une fonction motrice, en permettant aux dispositifs électroniques qu'il comporte d'échanger des signaux avec un réseau de neurones. Syn.: prothèse neurale, prothèse neuronale. (*neuroprosthesis*)

optoélectronique – branche de l'électronique qui traite de la transformation des signaux électriques en signaux optiques et vice-versa. Syn.: optronique. (*optoelectronics*)

particule ultrafine – particule en suspension dans l'air dont le diamètre aérodynamique mesure entre 1 et 100 nanomètres. Abr.: PUF. (*ultrafine particle*)

peinture solaire – matériau flexible qui comporte des cellules solaires de taille nanométrique, que l'on peut étaler comme de la peinture sur une surface et qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Syn.: peinture photovoltaïque. (*solar paint, photovoltaic paint*)

phase – chacune des différentes parties d'un système physicochimique, qui est homogène par sa composition et son état physique, et qui est séparée d'une autre par une interface. (*phase*)

photolithographie – technique qui permet de reproduire, dans une résine déposée à la surface d'un matériau, le motif d'une structure micrométrique, en utilisant un faisceau lumineux comme outil d'impression. Syn.: lithographie optique. (*photolithography, optical lithography, photo-lithography*)

physique quantique – branche de la physique moderne qui propose d'expliquer plusieurs phénomènes liés au fonctionnement de la matière par l'existence et le comportement des quanta, lesquels sont des particules élémentaires d'énergie, détectables uniquement à l'échelle microscopique. Syn.: mécanique quantique, théorie quantique. (*quantum physics, quantum mechanics, quantum theory*)

pile à combustible – convertisseur d'énergie dont l'hydrogène, qui peut être obtenu à partir d'un combustible, est combiné avec l'oxygène de l'air par procédé électrochimique, pour produire de l'électricité. (*fuel cell*)

point quantique – structure nanométrique semi-conductrice, qui résulte du confinement du mouvement des électrons dans les trois dimensions de l'espace. Syn.: boîte quantique, nanocrystal, nanopoint, nano-îlot, atome artificiel. (*quantum dot [QD, Qdot, Q-dot], quantum box, nanocrystal, nanodot, artificial atom*)

polymère – substance composée d'un grand nombre de petites structures moléculaires de faible masse, identiques ou différentes, qui se lient entre elles, en chaîne ou en réseau, pour créer des molécules comportant une masse moléculaire élevée. (*polymer*)

poussière électronique communicante – ensemble de puces intégrant des composants de taille micrométrique ou nanométrique, qui sont reliées entre elles de manière à former un réseau sans fil, à l'intérieur duquel elles peuvent échanger les données qu'elles recueillent, traitent et transmettent, le cas échéant, à une unité centrale, lorsqu'elles sont, comme des particules de poussière, pulvérisées dans l'air ou répandues dans des matériaux. Syn.: poussière communicante, poussière intelligente. (*smart dust*)

puce à ADN – petite plaque en verre, en silicium ou en plastique, sur laquelle sont déposées des séquences nucléiques connues d'ADN, qui sont caractéristiques de certains gènes et qui, dans un mélange de molécules, en s'appariant avec des séquences nucléiques complémentaires, permettent de détecter la présence des mêmes gènes dans des cellules soumises à l'analyse. Syn.: puce ADN, biopuce à ADN, biopuce ADN, micromatrice d'ADN, microréseau d'ADN, micromatrice, microréseau. (*DNA chip, DNA biochip, DNA microarray, DNA array, microarray*)

puits quantique – structure nanométrique bidimensionnelle, qui résulte du confinement du mouvement des électrons dans une seule dimension de l'espace. (*quantum well*)

surface spécifique – dimension totale de la surface d'un corps, rapportée à sa masse ou son volume. Syn.: surface massique, aire massique. (*specific surface*)

technologie de rupture – ensemble de nouveaux procédés et de nouvelles techniques dont la mise en œuvre a des répercussions importantes sur l'utilisation de technologies plus anciennes. Syn.: technologie perturbatrice. (*disruptive technology*)

technologie habilitante – ensemble de nouveaux procédés et de nouvelles techniques qui permettent à des technologies déjà existantes de s'améliorer. Syn.: technologie facilitante. (*enabling technology*)

thérapie génique – opération consistant à introduire un gène fonctionnel dans des cellules d'un organisme, à des fins préventives, curatives ou diagnostiques. Syn.: génothérapie. (*gene therapy*)

vectorisation de médicaments – opération par laquelle on associe des médicaments à des structures moléculaires capables d'acheminer le principe actif qu'ils contiennent vers l'endroit exact où celui-ci doit entrer en action dans un organe, un tissu ou une cellule. Syn.: vectorisation de médicament, vectorisation, ciblage de médicaments, ciblage de médicament. (*drug targeting*)

Bibliographie*

Textes cités en référence

- ABE, Lisa K., *Nanotechnology Law: The Legal Issues*, communication présentée dans le cadre de NanoForum 2005, Université McGill.
- ACADÉMIE DES SCIENCES ET ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (France), *Nanosciences – Nanotechnologies*, Rapport sur la science et la technologie n° 18, Paris, avril 2004 [en ligne] http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST18.htm.
- ALTMANN, Jürgen, « Military Uses of Nanotechnology: Perspectives and Concerns », *Security Dialogue*, vol. 35, n° 1, 2004.
- ALTMANN, Jürgen et Mark Avrum GUBRUD, « Military, Arms Control, and Security Aspects of Nanotechnology », dans D. Baird, A. Nordmann et J. Schummer (dir.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam, IOS Press, 2004 [en ligne] <http://cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/toc.html>.
- AMBASSADE DE FRANCE AU DANEMARK, *Les nanotechnologies au Danemark*, novembre 2005 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_095.htm.
- AMBASSADE DE FRANCE AUX ÉTATS-UNIS, *Sciences physiques*. Nanoscience, microélectronique, matériau, « Dossier : Les nanobiotechnologies », n° 04, juin 2003 [en ligne] http://www.senat.fr/opecst/annexe_ambassade_de_france_USA.pdf.
- AMBASSADE DE FRANCE EN ALLEMAGNE, *Les nanotechnologies en Allemagne*, Domaines des nanomatériaux et de la nanoélectronique, octobre 2005 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_085.htm.
- ANDRÉ, Francis, *Libre accès aux savoirs/Open Access to Knowledge*, Paris, Futuribles, 2005.
- ARNALL, Alexander Huw, *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics ; A Technical, Political and Institutional Map of Emerging Technologies*, A report for the Greenpeace Environmental Trust, Londres, juillet 2003 [en ligne] <http://www.greenpeace.org.uk/MultimediaFiles/Live/FullReport/5886.pdf>.
- BALDUS, John *et al.*, « Getting Nanotechnology Right the First Time », *Issues in Science and Technology*, vol. XXI, n° 4, été 2005 [en ligne] <http://www.issues.org/21.4/balbus.html>.
- BÉGIN, Luc, « Éthique environnementale », dans Gilbert Hottois et Jean-Noël Missa (dir.), *Nouvelle encyclopédie de bioéthique. Médecine. Environnement. Biotechnologie*, Bruxelles, Éditions DeBoeck Université, 2001.
- BÉLAND, Jean-Pierre (sous la direction de), *L'Homme biotech : humain ou posthumain ?*, Québec, Les Presses de l'Université Laval, 2006.
- BELEM, Gisèle, « L'analyse du cycle de vie comme outil de développement durable », sous la direction de Jean-Pierre Revéret et Corinne Gendron, *Les cahiers de la Chaire*, collection recherche, Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, n° 08-2005 [en ligne] <http://www.crsdd.uqam.ca/pdf/pdfCahiersRecherche/08-2005.pdf>.

* Sauf mention particulière, toutes les adresses Internet étaient accessibles le 14 juin 2006, soit directement ou par le biais des archives de certains sites.

- BERNIER, Patrick, « Nanosciences et nanotechnologies : dimension sociétale et problèmes de santé publique », *Nanosciences et Nanotechnologies : une réflexion prospective*, mai 2005 [en ligne] http://www.recherche.gouv.fr/mstp/nano_mstp2005.pdf.
- BIBEL, W. (dir.), *Converging Technologies and the Natural, Social and Cultural World*, Special Interest Group Report for the European Commission via an Expert Group on Foresighting the New Technology Wave, 26 juillet 2004 [en ligne] http://ec.europa.eu/research/conferences/2004/ntw/pdf/sig4_en.pdf.
- BUREAU DU CONSEILLER NATIONAL DES SCIENCES (Canada), *Assessment of Canadian Research Strengths in Nanotechnology: Report of the International Scientific Review Panel*, novembre 2005.
- CABLE, Josh, « A Best Practices Approach to Minimizing EHS Risk in Nanotechnology Manufacturing », *Occupational Hazards*, 6 octobre 2005 [en ligne] http://www.occupationalhazards.com/safety_zones/42/article.php?id=14129.
- CALLON, Michel et al., *Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies. Les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ?*, Grenoble, 22 septembre 2005 [en ligne] http://sciencescitoyennes.org/IMG/pdf/NanoGrenoble_rapport_final_05_09_22.pdf.
- CALIFORNIA COUNCIL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, *Nanoscience and Nanotechnology. Opportunities and Challenges in California*, A Briefing for the Joint Committee on Preparing CA for the 21st Century, California, janvier 2004 [en ligne] http://www.larta.org/lavox/articlelinks/2004/040223_nanoreport.pdf.
- CAPLAN, Arthur, « Is it wrong to try to improve human nature? », dans Paul Miller et James Wilsdon (dir.), *Better Humans? The Politics of Human Enhancement and Life Extension*, DEMOS, collection 21, 2006 [en ligne] <http://www.demos.co.uk/catalogue/betterhumanscollection/>.
- CARTY, Arthur J., *Discours principal – Nanoforum Canada*, Forum canadien sur la nanoscience et la nanotechnologie, Edmonton, 17 juin 2004 [en ligne] http://science.pco-bcp.gc.ca/docs/speechesdiscours/speechesdiscours/2004_0617_nanoforum_f.pdf.
- CENTRE SUD, *Effets potentiels des nanotechnologies sur les marchés de produits de base : répercussions sur les pays en voie de développement tributaires de produits de base. Agenda lié au commerce pour le développement et l'équité (T.R.A.D.E.)*, document de recherche n° 4, préparé par ETC, novembre 2005 [en ligne] http://www.southcentre.org/publications/researchpapers/ResearchPapers4_FR.pdf.
- CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RÉFÉRENCE SUR L'ANALYSE, L'INTERPRÉTATION ET LA GESTION DU CYCLE DE VIE DES PRODUITS, PROCÉDÉS ET SERVICES – CIRAIG, *Mémoire*, dans le cadre de la consultation sur le projet de Plan de développement durable du Québec et de l'Avant-projet de Loi sur le développement durable, février 2005 [en ligne] http://www.polymtl.ca/ciraig/Memoire_CIRAIG_DD.pdf.
- CHEMICAL AND ENGINEERING NEWS, « Nanotechnology. Drexler and Smalley make the case for and against 'molecular assemblers' », *Point-Counterpoint*, vol. 81, n° 48, 1^{er} décembre 2003 [en ligne] <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.
- CLUB, « La nanotechnologie au service des écrans plats », le magazine de l'Université Claude-Bernard – Lyon 1, n° 4, avril 2004 [en ligne] http://www.univ-lyon1.fr/1126880808734/0/fiche___document/.
- COBB, Michael et Jane MACOUBRIE, « Public Perceptions about Nanotechnology: Risks, Benefits and Trust », *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 6, n° 4, août 2004 [en ligne] <http://www.wilsoncenter.org/events/docs/macoubriereport.pdf>.
- COCKE, William, « Male Fish Producing Eggs in Potomac River », *National Geographic News*, 3 novembre 2004 [en ligne] http://news.nationalgeographic.com/news/2004/11/1103_041103_potomac_fish.html.

- COMMERCE INTERNATIONAL CANADA, « Fiche d'information canadienne sur des thèmes de S-T pour le Sommet sur la technologie de 2005 à New Delhi (Inde) » [en ligne] http://www.infoexport.gc.ca/science/india_techsummit_thprof-fr.htm.
- COMMISSARIAT À LA PROTECTION DE LA VIE PRIVÉE DU CANADA, *Rapport annuel au Parlement 2004*, Rapport concernant la Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques, 2005 [en ligne] http://www.privcom.gc.ca/information/pub/pa_reform_060605_f.asp.
- COMMISSARIAT À LA PROTECTION DE LA VIE PRIVÉE DU CANADA, « La Commissaire à la protection de la vie privée dépose un rapport et se prononce en faveur d'une réforme urgente de la Loi sur la protection des renseignements personnels du Canada », Communiqué, Ottawa, 5 juin 2006 [en ligne] http://www.privcom.gc.ca/media/nr-c/2006/nr-c_060605_f.asp.
- COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les enjeux éthiques des banques d'information génétique: pour un encadrement démocratique et responsable*, Gouvernement du Québec, 2003 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/AvisBanquesGen.pdf>.
- COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Pour une gestion éthique des OGM*, Gouvernement du Québec, 2003 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/CESTAvisOGMfinal.pdf>.
- COMMISSION DE L'ÉTHIQUE DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *L'utilisation des données biométriques à des fins de sécurité: questionnaire sur les enjeux éthiques*, Document de réflexion, Gouvernement du Québec, 2005 [en ligne] <http://www.ethique.gouv.qc.ca/fr/ftp/Biometrie-reflexion.pdf>.
- COMMISSION DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES, DE LA DÉFENSE ET DES FORCES ARMÉES (France), *Rapport d'information, fait au Sénat à la suite d'une mission sur le rôle des drones dans les armées*, Maryse Bergé-La Vigne et Philippe Nogrix, sénateurs, Rapport n° 215, 22 février 2006 [en ligne] <http://www.senat.fr/rap/r05-215/r05-215.html>.
- COMMISSION MONDIALE D'ÉTHIQUE DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES ET DES TECHNOLOGIES – COMEST, *Le principe de précaution*, Paris, UNESCO, 2005 [en ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001395/139578f.pdf>.
- COMMITTEE ON SCIENCE (États-Unis), « More research on environmental [sic], safety impacts of nanotechnology is critical to success of the industry, witnesses say », Communiqué, Washington, 17 novembre 2005 [en ligne] www.house.gov/science/press/109/109-165.htm.
- CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE, *Les nanotechnologies: la maîtrise de l'infiniment petit*, Gouvernement du Québec, juin 2001 [en ligne] <http://www.cst.gouv.qc.ca/Les-nanotechnologies-la-maitrise>.
- CRICHTON, Michael, *Prey*, New York, HarperCollins, 2002 ; en français: *La Proie*, Paris, Éditions Robert Laffont, 2003.
- D'AUTEUIL-ROBILLARD, Sylvain, « Les orphelins du développement économique », *PME*, vol. 21, n° 10, décembre-janvier 2005.
- DAVIES, J. Clarence, *Managing the Effects of Nanotechnology*, Woodrow Wilson International Center for Scholars, Project on Emerging Nanotechnologies, Washington, 27 janvier 2006 [en ligne] <http://www.wilsoncenter.org/events/docs/Effectsnanotechfinal.pdf>.
- DE RUS, Éric, « Humanisme et transhumanisme: l'Homme en question », *L'Observatoire de la génétique*, n° 26, février-mars 2006 [en ligne] http://www.ircm.qc.ca/bioethique/obsogenetique/cadrages/cadr2006/c_no26_06/c_no26_06_02.html.
- DOUGLAS, Kate *et al.*, « 11 Steps to a Better Brain », *NewScientist.com*, 25 mai 2005 [en ligne] <http://www.newscientist.com/channel/being-human/mg18625011.900>.
- DREHER, Kevin L., « Toxicological Highlight. Health and Environmental Impact of Nanotechnology: Toxicological Assessment of Manufactured Nanoparticles », *Toxicological Sciences*, vol. 77, n° 1, 2004 [en ligne] <http://171.66.120.171/cgi/content/full/77/1/3>.

- DREXLER, K. Eric, *Engines of Creation*, New York, Anchor Books, 1986 ; en français: *Engins de création. L'avènement des nanotechnologies*, traduit de l'américain par Marc Macé, Paris, Vuibert, 2005.
- DUPUY, Jean-Pierre, « Le problème théologico-scientifique et la responsabilité de la science », *Les effets sur le rapport à la nature* (effets ontologiques), 2004 [en ligne] http://formes-symboliques.org/article.php?id_article=66.
- DUPUY, Jean-Pierre et Françoise ROURE, *Les nanotechnologies: éthique et prospective industrielle*, Tome 1, Conseil général des mines et Conseil général des technologies de l'information, Section « Innovation et Entreprise », 15 novembre 2004 [en ligne] <http://www.cgm.org/themes/deveco/develop/nanofinal.pdf>.
- ECONOMIC AND SOCIAL RESEARCH COUNCIL (Royaume-Uni), *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology*, Swindon, juillet 2003 [en ligne] <http://www.shef.ac.uk/physics/people/rjones/PDFs/SECNanotechnology.pdf>.
- EINSIEDEL, Edna F., *In the Public Eye: The Early Landscape of Nanotechnology among Canadian and U.S. Publics*, Report to the Canadian Biotechnology Secretariat and the NSERC Nanotechnology Innovation Platform, University of Calgary, non daté [en ligne] <http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=1468>.
- EINSIEDEL, Edna F. et Linda GOLDENBERG, « Dwarfing the Social? Nanotechnology Lessons from the Biotechnology Front », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/cgi/reprint/24/1/28>.
- ENVIRONNEMENT CANADA, *Gestion du cycle de vie environnementale [sic] : Un guide des meilleurs [sic] décisions commerciales* [en ligne] <http://www.ec.gc.ca/ecocycle/fr/lcmguid.cfm>.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (États-Unis), *External Review Draft. Nanotechnology White Paper*, Science Policy Council, Washington, 2 décembre 2005 [en ligne] http://www.epa.gov/osa/pdfs/EPA_nanotechnology_white_paper_external_review_draft_12-02-2005.pdf.
- ENVIRONMENTAL SERVICES ASSOCIATION OF ALBERTA (Canada) – ESAA, *Nanotechnology in the Environment Industry: Opportunities and Trends*, Final Report and Bibliography for the Nano-Environmental Cross-Sector Initiative, 4 mars 2005 [en ligne] [http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/\\$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf](http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf).
- ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, *From Genome to Atoms. The Big Down, Atomtech: Technologies Converging at the Nano-scale*, Winnipeg, janvier 2000 [en ligne] <http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>.
- ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, « No Small Matter II: The Case for a Global Moratorium. Size Matters! », *Occasional Paper Series*, vol. 7, n° 1, avril 2003 [en ligne] http://www.etcgroup.org/documents/Occ.Paper_Nanosafety.pdf.
- ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, *Down on the Farm. The Impact of Nano-scale Technologies on Food and Agriculture*, Canada, 23 novembre 2004 [en ligne] http://www.etcgroup.org/documents/NR_DownonFarm_final.pdf.
- EUROPEAN COMMISSION. COMMUNITY HEALTH AND CONSUMER PROTECTION, *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop Organized in Brussels on 1-2 March 2004* by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission [en ligne] http://ec.europa.eu/comm/health/ph_risk/documents/ev_20040301_en.pdf.
- FEDERAL INSTITUTE FOR RISK ASSESSMENT (Allemagne), « Nanoparticles Were Not the Cause of Health Problems Triggered by Sealing Sprays! », Communiqué, 26 mai 2006 [en ligne] <http://www.bfr.bund.de/cms5w/sixcms/detail.php/7842>.
- FERRARI, Mauro, « Cancer Nanotechnology: Opportunities and Challenges », *Nature Reviews: Cancer*, vol. 5, 7 mars 2005 [en ligne] http://nano.cancer.gov/news_center/nanotech_news_2005-03-07b.asp.

- FEYNMAN, Richard P., « There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics », *Engineering and Science*, vol. 23, n° 5, 1960 [en ligne] <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.
- FONDS DE LA RECHERCHE EN SANTÉ DU QUÉBEC – FRSQ, *Guide d'éthique de la recherche et d'intégrité scientifique*, Standards en éthique de la recherche et en intégrité scientifique du FRSQ, 2^e éd., août 2003 [en ligne] <http://www.frsq.gouv.qc.ca/fr/ethique/ethique.shtml>.
- FRANK, Abby, « Nanotechnology Myths », *Earth & Sky Radio Series*, avril 2005 [en ligne] http://www.earthsky.org/shows/nanotechnology_articles_myths.php.
- GALEMBECK, Fernando, « Les questions éthiques posées par la nanotechnologie. – Ethical Issues in Nanotechnology », COMEST – Troisième Session, Rio de Janeiro, Brésil, 1-4 décembre 2003, *Actes*, UNESCO [en ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001343/134391fo.pdf>.
- GÉNOME PRAIRIE (Canada), *Premières impressions: comprendre les opinions du public sur les technologies émergentes*, Document établi par l'équipe GE³LS de Génome Prairie à l'Université de Calgary, non daté [en ligne] https://bioportal.gc.ca/CMFiles/CBS_Report_FINAL_FRENCH249SFP-9222005-5789.pdf.
- GLOBAL SECURITY.ORG, « Future Combat Systems (FCS) » [en ligne] <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/fcs.htm>.
- GODARD, Olivier, « Principe de précaution », *Nouvelle encyclopédie de bioéthique. Médecine. Environnement. Biotechnologie*, Gilbert Hottois et Jean-Noël Missa (dir.), Bruxelles, Éditions DeBoeck Université, 2001.
- GODARD, Olivier, « Le principe de précaution et la proportionnalité face à l'incertitude scientifique », *Rapport public 2005: jurisprudence et avis de 2004. Responsabilité et socialisation du risque*, Conseil d'État, Paris, La Documentation française, 2005.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Charte canadienne des droits et libertés*, Annexe B de la Loi de 1982 sur le Canada, 1982, ch. 11 (R.-U.), L.R.C. (1985), app. II, n° 44 [en ligne] http://laws.justice.gc.ca/en/charter/const_fr.html.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Code canadien du travail* (L.R., 1985, ch. L-2) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/L-2/>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (1999, ch. 33) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/C-15.31/texte.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi de 1992 sur le transport des marchandises dangereuses* (1992, ch. 34) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/T-19.01/index.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi sur la protection des renseignements personnels* (L.R., 1985, ch. P-21) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/P-21/index.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi sur la protection des renseignements personnels et les documents électroniques* (C-6) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/P-8.6/260686.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi sur le contrôle des renseignements relatifs aux matières dangereuses* (L.R., 1985, ch. 24, 3^e suppl.) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-2.7/texte.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi sur les aliments et drogues* (L.R., 1985, ch. F-27) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Loi sur les produits dangereux* (L.R., 1985, ch. H-3) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-3/texte.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail* (DORS/86-304) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/L-2/DORS-86-304/>.

- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Règlement sur le contrôle des renseignements relatifs aux matières dangereuses* (DORS/88-456) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-2.7/DORS-88-456/texte.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses* (DORS/2001-286) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/T-19.01/DORS-2001-286/180329.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Règlement sur les aliments et drogues* (C.R.C., ch. 870) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/F-27/C.R.C.-ch.870/texte.html>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Règlement sur les produits contrôlés* (DORS/88-66) [en ligne] <http://lois.justice.gc.ca/fr/H-3/DORS-88-66/>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Charte des droits et libertés de la personne* (L.R.Q., c. C-12) [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/c-12/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Code civil du Québec* (L.R.Q., c. C-1991) [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/ccq/20060525/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi concernant le cadre juridique des technologies de l'information* (L.R.Q., c. C-1.1), [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/c-1.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels* (L.R.Q., c. A-2.1) [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/a-2.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur la protection des renseignements personnels dans le secteur privé* (L.R.Q., c. P-39.1) [en ligne] <http://www.canlii.org/qc/legis/loi/p-39.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur la qualité de l'environnement* (L.R.Q., c. Q-2) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/loi/q-2/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (L.R.Q., c. S-2.1) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/loi/s-2.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Loi sur le développement durable* (L.R.Q., c. D-8.1.1) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/loi/d-8.1.1/20060525/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Plan de développement durable du Québec*, Document de consultation, novembre 2004 [en ligne] <http://www.mddep.gouv.qc.ca/developpement/2004-2007/plan-consultation.pdf>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur l'information concernant les produits contrôlés au Québec* (c. S-2.1, r.10.1) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/s-2.1r.10.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur la qualité de l'atmosphère* (c. Q-2, r.20) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.20/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (c. Q-2, r.18.1.1) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.4.1/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (c. S-2.1, r.19.01) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/s-2.1r.19.01/20060412/tout.html>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur les matières dangereuses* (R.Q., c. Q-2, r.15.2) [en ligne] <http://www.ijcan.org/qc/legis/regl/q-2r.15.2/20060412/tout.html>.
- GROSS-SOROKIN, Melanie Y., Stephen D. ROAST et Geoffrey C. BRIGHTY, « Assessment of Feminization of Male Fish in English Rivers by the Environment Agency of England and Wales », *Environmental Health Perspective*, vol. 114, n° S-1, avril 2006 [en ligne] <http://www.ehponline.org/members/2005/8068/8068.pdf>.

- GRÜTTER, Peter et Mark ROSEMAN, *A Study of Canadian Academic Nanoscience Funding: Review & Recommendations*, NSERC/CRSNG NanoIP/PIC, juin 2004 [en ligne] http://www.physics.mcgill.ca/NSERCnanoIP/e/Canada_Nano_Funding.pdf.
- HASSAN, Mohamed H.A, « Small Things and Big Changes in the Developing World », *Science, Policy Forum, Nanotechnology*, vol. 309, 1^{er} juillet 2005 [en ligne] <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/309/5731/65.pdf>.
- HUNYADI, Mark, « Qu'est-ce que le principe de précaution? Nouvelles réflexions sur les usages du PP », notes de présentation, Séminaire sur le principe de précaution, Commission de l'éthique de la science et de la technologie, 4 novembre 2005.
- INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les nanoparticules. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité du travail*, Claude Ostiguy et collaborateurs, Rapport R-455, Études et recherches, Gouvernement du Québec, mars 2006 [en ligne] http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100189.html.
- INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN SÉCURITÉ DU TRAVAIL – IRSST, *Les effets à la santé reliés aux nanoparticules*, Claude Ostiguy et collaborateurs, Rapport R-451, Études et recherches, Gouvernement du Québec, mars 2006 [en ligne] http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100185.html.
- INSTITUT FRANÇAIS DE L'ENVIRONNEMENT, *Signaux précoces et leçons tardives: le principe de précaution – 1896-2000*, Orléans, 2004 [en ligne] http://www.developpement.durable.sciences-po.fr/publications/Bibliographies/signaux_precoces.pdf.
- INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHU – IÖW, *Nanotechnology and Regulation within the Framework of the Precautionary Principle*, Final Report, Rüdiger Haum *et al.*, Berlin, février 2004.
- INSTITUTE OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY TRUST FUND (Royaume-Uni), « Nanotechnology », Information Statement, février 2006 [en ligne] <http://www.ifst.org/uploadedfiles/cms/store/ATTACHMENTS/Nanotechnology.pdf>.
- INSTITUTE OF MEDICINE (États-Unis), *Implications of Nanotechnology for Environmental Health Research*, Lynn Goldman et Christine Coussens (dir.), Roundtable on Environmental Health Sciences, Research and Medicine, Board of Health Sciences Policy, Washington, D.C., The National Academies Press, 2005 [en ligne] <http://www.nap.edu/catalog/11248.html>.
- INSTITUTS DE RECHERCHE EN SANTÉ DU CANADA, CONSEIL DE RECHERCHES EN SCIENCES NATURELLES ET EN GÉNIE DU CANADA, CONSEIL DE RECHERCHES EN SCIENCES HUMAINES DU CANADA, *Énoncé de politique des trois Conseils. Éthique de la recherche avec des êtres humains*, août 1998, modifié en 2000, 2002 et 2005 [en ligne] http://www.pre.ethics.gc.ca/francais/pdf/TCPS%20octobre%202005_F.pdf.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON NANOTECHNOLOGY, « Nano Coalition Unveils Environmental, Health and Safety Database », Communiqué de presse, Houston, 19 août 2005 [en ligne] http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=11111.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON NANOTECHNOLOGY – ICON, Environmental, Health and Safety Database [en ligne] <http://icon.rice.edu/research.cfm>.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO, *Convention internationale du 1^{er} novembre 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer* (International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS – 1974) [en ligne] http://www.imo.org/Conventions/contents.asp?topic_id=257&doc_id=647#description.
- INTERNATIONAL RISK GOVERNANCE COUNCIL, *Survey on Nanotechnology Governance, Volume A. The Role of Government*, IRGC Working Group on Nanotechnology, décembre 2005 [en ligne] http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/fremde_publicationen/IGRC_Nano_Governance.pdf.

- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION – ISO, « L'ISO lance des travaux sur les normes relatives aux nanotechnologies », Communiqué de presse, 28 novembre 2005 [en ligne] <http://www.iso.org/iso/fr/commcentre/pressreleases/archives/2005/Ref980.html>.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION – ISO, « Environmental Management. The ISO 14000 Family of International Standards » [en ligne] <http://www.iso.org/iso/en/prods-services/otherpubs/iso14000/index.html>.
- ISPUB.COM, *THE INTERNET JOURNAL OF NANOTECHNOLOGY*, « Nano-Bio-Technology Excellence in Health Care : A Review », Rajesh, Gitanjaly, Surbhi, vol. 1, n° 2, 2005 [en ligne] <http://www.ispub.com/ostia/index.php?xmlFilePath=journals/ijnt/vol1n2/nanotech.xml>.
- JOY, Bill, « Why the future doesn't need us », *Wired*, 8 avril 2000 [en ligne] <http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy.html>.
- KEARNES, Matthew, Phil MACNAGHTEN et James WILSDON, *Governing at the Nanoscale. People, Policies and Emerging Technologies*, Londres, DEMOS, 2006 [en ligne] <http://www.demos.co.uk/catalogue/governingatthenanoscale/>.
- KOURILSKY, Philippe et Geneviève VINEY, *Le principe de précaution*, Rapport au Premier Ministre, Paris, 15 octobre 1999 [en ligne] <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/004000402/index.shtml>.
- KULINOWSKI, Kristen, « Nanotechnology: From “Wow” to “Yuck”? », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/cgi/content/short/24/1/13>.
- LEBEAU, Daniel, *Aperçu de la recherche sur les nanotechnologies*, Document d'information, Conseil de la science et de la technologie, Gouvernement du Québec, juin 2001 [en ligne] <http://www.cst.gouv.qc.ca>.
- LES AFFAIRES, « Emballage bioactif pour le secteur alimentaire. Les nanotechnologies pour de meilleurs emballages », 3 mars 2006.
- LIN, Patrick et Fritz ALLHOFF, « Nanoethics and Human Enhancement: A Critical Evaluation of Recent Arguments », *Nanotechnology Perceptions*, vol. 2, n° 1, 27 mars 2006 [en ligne] <http://nanoethics.org/paper032706.html>.
- LUTHER, Wolfgang (éd.), *Industrial Application of Nanomaterials – Chances and Risks*, Technological Analysis, with the Support of the European Commission, août 2004 [en ligne] <http://www.vdi.de/vdi/organisation/schnellauswahl/techno/arbeitsgebiete/zukunft/sub/10803/index.php>.
- LUX RESEARCH, *Revenue from Nanotechnology-Enabled Products to Equal IT and Telecom by 2014, Exceed Biotech by 10 Times*, Communiqué, 25 octobre 2004, http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_SizingReport.pdf.
- MARRIS, Claire, coauteure du rapport PABE [Public Perceptions of Agricultural Biotechnologies in Europe] : « Public Views on GMOs: Deconstructing the Myths », *EMBO Reports*, vol. 2, n° 7, juillet 2001 [en ligne] <http://www.emboreports.org>.
- MEDICAL NEWS TODAY, « FDA Panel Suggests Adding Black Box Warning to ADHD Medications about Risk of Sudden Death, Heart Problems », 16 février 2006 [en ligne] <http://www.medicalnewstoday.com/medicalnews.php?newsid=37631>.
- MEHTA, Michael D., « From Biotechnology to Nanotechnology: What Can We Learn from Earlier Technologies? », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004 [en ligne] <http://www.nanoandsociety.com/ourlibrary/documents/mehta-feb2004a.pdf>.
- MERIDIAN INSTITUTE ET NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, *International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology*, Virginie, 17-18 juin 2004 [en ligne] http://www.meridian-nano.org/Final_Report_Responsible_Nanotech_RD_040812.pdf.
- MERIDIAN INSTITUTE, *Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks. Closing the Gaps within and between Sectors of Society*, janvier 2005 [en ligne] <http://www.nanoandthepoor.org>.

- MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SERVICES SOCIAUX (Québec), *Plan d'action ministériel en éthique de la recherche et en intégrité scientifique*, 1998 [en ligne] <http://ethique.msss.gouv.qc.ca/site/download.php?id=1081608,5,1>.
- MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France), *À la découverte du nanomonde*, Paris, 2003 [en ligne] <http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/docs/plaq.nanomonde.pdf>.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE, DE L'INNOVATION ET DE L'EXPORTATION (Québec), « Nanotechnologies au Québec », février 2006 [en ligne] http://www.mdeie.gouv.qc.ca/page/web/portail/scienceTechnologie/nav/technologies_strategiques/42648/65662.html?iddoc=65662.
- MNYUSIWALLA, Anisa, Abdallah S. DAAR et Peter A. SINGER, « “Mind the Gap”: Science and Ethics in Nanotechnology », Institute of Physics Publishing, *Nanotechnology*, 14, R9-R13, 2003 [en ligne] <http://www.utoronto.ca/jcb/home/documents/nanotechnology.pdf>.
- NANOFORUM.ORG, *4th Nanoforum Report: Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of Nanotechnology*, juin 2004 [en ligne] http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~scid~341~.html?action=longview_publication&.
- NANOPIC, *La plate-forme d'innovation du CRSNG en nanoscience et en nanotechnologie*, 2005 [en ligne] <http://www.physics.mcgill.ca/NSERCnanoIP/f/>.
- NANOTECH NEWS, « Nanoparticles Provide View of Drug Delivery into the Brain », 9 janvier 2006 [en ligne] http://nano.cancer.gov/news_center/nanotech_news_2006-01-09b.asp.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH – NIOSH (États-Unis), *NIOSH Position statement on Nanotechnology: Advancing Research on Occupational Health Implications and Applications*, (non daté) [en ligne] www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/position.html.
- NATIONAL PLANNING WORKSHOP (États-Unis), *Nanoscale Science and Engineering for Agriculture and Food Systems*, A Report submitted to Cooperative State Research, Education and Extension Service, the United States Department of Agriculture, National Planning Workshop, 18-19 novembre 2002, Washington, D.C., septembre 2003 [en ligne] http://www.csrees.usda.gov/nea/technology/pdfs/nanoscale_10-30-03.pdf.
- NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL (États-Unis), *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report*, septembre 1999 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Research.Directions/cover.pdf>.
- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (États-Unis), *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Arlington, Virginia, mars 2001 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/societalimpact/nanosi.pdf>.
- NATIONS UNIES, *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement* [en ligne] <http://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm#three>.
- NATIONS UNIES, *Investir dans le développement: plan pratique pour réaliser les objectifs du Millénaire pour le développement*, Projet Objectifs du Millénaire, Rapport au Secrétaire général de l'ONU, New York, 2005 [en ligne] <http://www.unmillenniumproject.org/documents/french-complete-highres.pdf>.
- NEERGAARD, Laurant, « Federal Project Probes Environment, Genes », *Washingtonpost.com*, 8 février 2006 [en ligne] <http://abcnews.go.com/Health/wireStory?id=1596175>.
- NURKO, Andrea et Megan ROARTY, « Students Turn to Study Drugs to Improve Grades, Concentration », *GW Hatchet*, 19 avril 2004 [en ligne] <http://www.gwhatchet.com/media/storage/paper332/news/2004/04/19/Style/Students.Turn.To.Study.Drugs.To.Improve.Grades.Concentration-664366.shtml?noreferrer=200606011448&sourcedomain=www.gwhatchet.com>.
- O'HANLON, Michael, *Technological Change and the Future of Warfare*, Washington, D.C., Brookings Institution Press, 2000 [en ligne] http://www.brookings.edu/press/books/future_of_warfare.htm.

- OFFICE OF THE NATIONAL SCIENCE ADVISER (Canada), *Assessment of Canadian Research Strengths in Nanotechnology*, Report of the International Scientific Review Panel, novembre 2005 [en ligne, disponible sur demande].
- OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES (France), *Nanoscience et progrès médical*, Rapport de Jean-Louis Lorrain et Daniel Raoul, 6 mai 2004 [en ligne] <http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-off/i1588.asp>.
- OFFICE QUÉBÉCOIS DE LA LANGUE FRANÇAISE, *Le grand dictionnaire terminologique* [en ligne] <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>.
- ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les risques émergents au XXI^e siècle. Vers un programme d'action*, Paris, 2003.
- ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Incertitude et précaution : incidences sur les échanges et l'environnement*, Groupe de travail conjoint sur les échanges et l'environnement, 5 septembre 2002 [en ligne] [http://www.oecd.org/olis/2000doc.nsf/4f7adc214b91a685c12569fa005d0ee7/98a7c482bccb43afc1256c2b003fe2ce/\\$FILE/JT00130908.PDF](http://www.oecd.org/olis/2000doc.nsf/4f7adc214b91a685c12569fa005d0ee7/98a7c482bccb43afc1256c2b003fe2ce/$FILE/JT00130908.PDF).
- ORGANISATION DES NATIONS UNIES – ONU, *Règlement type de l'ONU. Recommandations relatives au transport des marchandises dangereuses*, Quatorzième édition révisée, 2005 [en ligne] http://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev14/14files_f.html.
- PAUTRAT, Jean-Louis, « Comment définir les nanosciences? », *Rapport sur « Nanosciences et progrès médical »*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (France), Paris, 2004 [en ligne] <http://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-off/i1588.asp>.
- PHOENIX, Chris et K. Eric DREXLER, « Safe Exponential Manufacturing », *Nanotechnology*, vol. 15, n° 8, août 2004 [en ligne] <http://crnano.org/IOP%20-%20Safe%20Exp%20Mfg.pdf>.
- PHYSORG.COM, « Nanotechnology brings brain recovery in sight », MIT, 14 mars 2006 [en ligne] <http://www.physorg.com/news11755.html>.
- PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel*, Washington, D.C., 18 mai 2005 [en ligne] <http://www.nano.gov/html/news/PCASTreport.htm>.
- PRESSE CANADIENNE, « Bureau en gros fera l'essai du RFID avec Bell », *Direction informatique express*, Le bulletin des actualités technologiques, 1^{er} novembre 2005 [en ligne] <http://www.directioninformatique.com/di/client/fr/DirectionInformatique/Nouvelles.asp?id=37276>.
- PRESTON, Christopher J., « The Promise and Threat of Nanotechnology. Can Environmental Ethics Guide US? », *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, Special issue on nanotech challenges, part II, vol. 11, n° 1, 2005 [en ligne] <http://www.hyle.org/journal/issues/11-1/preston.htm>.
- RESNIK, David B., « A Biotechnology Patent Pool: An Idea Whose Time Has Come? », *The Journal of Philosophy, Science & Law*, vol. 3, janvier 2003 [en ligne] <http://www.miami.edu/ethics/jpsl/archives/papers/biotechPatent.html>.
- ROCO, Mihail C. et William Sims BAINBRIDGE (dir.), *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*, National Science Foundation, Arlington, Virginia, juin 2002 [en ligne] http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_report.pdf.
- ROSEMAN, Mark, *An Overview of Nanotechnology in Canada. Report 2: A Review and Analysis of Foreign Nanotechnology Strategies*, developed for the Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (PMACST), Canada, 14 octobre 2005 [disponible sur demande] http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html.

- ROUGHLEY, David, Victor JONES et Aaron CRUIKSHANK, *An Overview of Nanotechnology in Canada. Report 3: The Canadian Industrial Capacity to Absorb Nanotechnology*, developed for the Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (PMACST), Canada, 31 octobre 2005 [disponible sur demande] http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html.
- SANDLER, Ronald et W.D. KAY, « The GMO-Nanotech (Dis)Analogy? », *Bulletin of Science, Technology and Society*, vol. 26, n° 1, février 2006.
- SANTÉ CANADA, *Ligne directrice à l'intention de l'industrie. Les bonnes pratiques cliniques: directives consolidées*, Direction générale des produits de santé et des aliments, 1997 [en ligne] http://www.hc-sc.gc.ca/dhp-mps/alt_formats/hpfb-dgpsa/pdf/prodpharma/e6_f.pdf.
- SCHUMMER, Joachim, « Identifying Ethical Issues Amidst the Nano Hype », *Expert Group on Nanotechnology and Ethics*, présentation PowerPoint, Paris, UNESCO, juillet 2005.
- SCIENCE-METRIX, *Canadian Biotechnology Initiatives Addressing Developing Countries Issues*, Final Report, David Campbell et Grégoire Côté, National Research Council Canada, Research Program Support Office, mars 2005 [en ligne] http://www.science-metrix.com/pdf/SM_2005_001_NRC_Biotechnology_Developing_Countries.pdf.
- SCIENCE-METRIX, *Canadian Stewardship Practices for Environmental Nanotechnology*, Stéphane Bergeron et Éric Archambault, pour le compte d'Environnement Canada, mars 2005 [en ligne] http://www.science-metrix.com/pdf/SM_2004_016_EC_Report_Stewardship_Nanotechnology_Environment.pdf.
- SCIENTIFIC AMERICAN, Special Issue, « Nanotech. The Science of the Small Gets Down to Business », septembre 2001.
- SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS – SCENIHR, *Opinion on the appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*, European Commission, septembre 2005 [en ligne] <http://files.nanobio-raise.org/Downloads/scenihr.pdf>.
- SHEETZ, Tanya *et al.*, « Nanotechnology: Awareness and Societal Concerns », *Technology in Society*, 27 août 2005.
- SHEREMETA, Lorraine, « Nanotechnology and the Ethical Conduct of Research Involving Human Subjects », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004 [en ligne] http://www.law.ualberta.ca/centres/hli/pdfs/hlr/v12_3/12-3-11%20Sheremeta.pdf.
- SHEREMETA, Lorraine, « Synthesis Paper. Nanotechnology: the NE³LS Issues », Prepared for Health Canada, 18 juillet 2005.
- SHEREMETA, Lorraine, « Nanoscience and Nanotechnology: The Ethical, Environmental, Economic, Legal and Social Issues (NE³LS) – An Overview of NE³LS Research in Canada », *Paper prepared for the Office of the National Science Advisor*, 13 septembre 2005.
- SHEREMETA, Lorraine et Abdallah S. DAAR, « The Case for Publicly Funded Research on the Ethical, Environmental, Economic, Legal and Social Issues Raised by Nanoscience and Nanotechnology (NE³LS) », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004.
- SINGER, Peter A., Fabio SALAMANCA-BUENTELLO et Abdallah S. DAAR, « Harnessing Nanotechnology to Improve Global Equity », *Issues in Science and Technology*, été 2005 [en ligne] <http://www.issues.org/21.4/singer.html>.
- SMALLEY, Richard E., « Of Chemistry, Love and Nanobots », *Scientific American*, septembre 2001.
- SMITH, Maurice, « Beadwork. Small, reusable beads target residual bitumen in oilsand tailings », *New Technology Magazine*, septembre 2004.
- SWISS Re, *Nanotechnology. Small Matter, Many Unknowns*, Annabelle Hett *et al.*, Swiss Reinsurance Company, Risk perception series, Suisse, 2004 [en ligne] <http://swissre.com>.

- THE ROYAL SOCIETY (Royaume-Uni), « Industry should disclose safety testing methods », Communiqué de presse, 4 mai 2006 [en ligne] <http://www.royalsoc.ac.uk/news.asp?year=&id=4639>.
- THE ROYAL SOCIETY & THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING (Royaume-Uni), *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*, Londres, The Royal Society, juillet 2004 [en ligne] <http://www.royalsoc.ac.uk/document.asp?id=2023>.
- UNION EUROPÉENNE, « Sixième Programme-cadre : Nanotechnologies et nanosciences », 2005 [en ligne] <http://www.europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/i23015.htm>.
- UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, *Patent Pools: A Solution to the Problem of Access in Biotechnology Patents?*, Jeanne Clark *et al.*, 5 décembre 2000 [en ligne] <http://www.uspto.gov/web/offices/pac/dapp/opla/patentpool.pdf>.
- VANDERBURG, Willem H., « Some Reflections on Teaching Biotechnology, Nanotechnology, and Information Technology », éditorial, *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004.
- WEINER, Tim, « A New Model Army Soldier Rolls Closer to the Battlefield », *The New York Times*, 16 février 2005 [en ligne] <http://www.nytimes.com/2005/02/16/technology/16robots.html?ex=1150084800&en=7451326017182257&ei=5070>.
- WEISS, Rick, « Nanotech Product Recalled in Germany », *Washington Post*, 6 avril 2006, p. A02 [en ligne] <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2006/04/05/AR2006040502149.html>.
- WOODROW WILSON CENTER FOR SCHOLARS, « A Nanotechnology Consumer Products Inventory » [en ligne] <http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>.
- WORLD TRANSHUMANIST ASSOCIATION, « La déclaration transhumaniste » [en ligne] <http://transhumanism.org/index.php/WTa/more/148>.

Autres textes consultés :

- AITKEN, R. John, Karen S. CREELY et C.L. TRAN, *Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review*, Institute of Occupational Medicine for the Health and Safety Executive 2004, Research Report 274, Grande-Bretagne [en ligne] <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr274.pdf>.
- ALLIANZ GROUP et OECD, *Small Sizes That Matter: Opportunities and Risks of Nanotechnologies*, Report in co-operation with the OECD International Futures Programme, non daté [en ligne] http://www.allianz.com/Az_Cnt/az/_any/cma/contents/796000/saObj_796424_allianz_study_Nanotechnology_engl.pdf.
- AMBASSADE DE FRANCE AU ROYAUME-UNI, *Premier rapport gouvernemental sur les risques liés aux nanoparticules*, Service Science et Technologie, février 2006 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/2006/smm06_020.htm.
- AMBASSADE DE FRANCE AUX ÉTATS-UNIS, *SCIENCES PHYSIQUES*. Nanoscience, microélectronique, matériau, « Les nanocomposites aux États-Unis: vers une émergence des premières applications », n° 11, mai 2004 [en ligne] http://www.france-science.org/publications/physique/PhysUSA_N11.pdf.
- AMBASSADE DE FRANCE EN INDE, *Les NanoSciences et NanoTechnologies en Inde*, 4 avril 2005 [en ligne] http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/smm05_017.htm.
- ANDRIEUX, Karine, Didier DESMAËLE, Jean D'ANGÉLO et Patrick COUVREUR, « Nanotechnologies et nouveaux médicaments », *L'actualité chimique*, novembre-décembre 2003 [en ligne] <http://ist.inserm.fr/basisdiaggen/AC/2003-11-12/Andrieux.pdf>.

- BABER, Zaheer, « «An Undifferentiated Mass of Grey Goo?» Nanotechnology and Society », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, février 2004 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/cgi/reprint/24/1/10>.
- BAI, Chunli, « Ascent of Nanoscience in China. Global Voices of Science (2005) », ESSAY, *Science*, vol. 309, n° 5731, 1^{er} juillet 2005 [en ligne] <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/309/5731/61.pdf>.
- BAILEY, Ronald, « Nanotechnology: Hell or Heaven? Perhaps a Little Bit of Both », *Reason Online*, 27 octobre 2004 [en ligne] <http://www.reason.com/rb/rb102704.shtml>.
- BAIRD, Davis et Joachim SCHUMMER, « Editorial: Nanotech Challenges, Part I », *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, vol. 10, n° 2, 2004 [en ligne] <http://www.hyle.org/journal/issues/10-2/editorial.htm>.
- BAKER, Stephen et Adam ASTON, « The Business of Nanotech », *Business Week Online*, 14 février 2005 [en ligne] http://www.businessweek.com/magazine/content/05_07/b3920001_mz001.htm.
- BAQUIAST, Jean-Paul, « Les nanotechnologies inaugurent-elles une nouvelle course aux armements? », *Automates Intelligents*, 23 août 2005 [en ligne] <http://www.automatesintelligents.com/echanges/2005/juil/armementnanotech.html>.
- BARCLAY, Laurie, « Human brain to machine interface may now be feasible », *Medscape Medical News*, 6 mai 2004 [en ligne] <http://www.medscape.com/viewarticle/475252?rss>.
- BARRIEU, Pauline et Bernard SINCLAIR-DESGAGNÉ, « The Paradox of Precaution », Série Scientifique. Scientific Series, 2003s-63, CIRANO – Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, Montréal, octobre 2003 [en ligne] <http://www.cirano.qc.ca/pdf/publication/2003s-63.pdf>.
- BAUM, Rudy, « Nanotechnology. Drexler and Smalley make the case for and against “molecular assemblers” », *CENEAR*, Point-Counterpoint, vol. 81, n° 48, 1^{er} décembre 2003 [en ligne] <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.
- BENOIT-BROWAEYS, Dorothée, « Nanopouvoirs : quels usages et quels buts pour nos sociétés? », *L'Observatoire de la génétique*, n° 19, novembre-décembre 2004 [en ligne]. http://www.ircm.qc.ca/bioethique/obsgenetique/cadrages/cadr2004/c_no19_04/ci_no19_04_01.html.
- BENOIT-BROWAEYS, Dorothée, « Les transhumains s'emparent des nanotechs », *Vivant*, n° 3, 3 mai 2005 [en ligne] http://www.vivantinfo.com/uploads/media/Nanotechnologies_transhumanisme.pdf.
- BENOIT-BROWAEYS, Dorothée, « Nanotechnologies. Une enquête », *Le Monde diplomatique*, Paris, mars 2006 [en ligne] http://www.monde-diplomatique.fr/2006/03/BENOIT_BROWAEYS/13299.
- BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, « Nanobots and nanotubes: Two alternative paradigms of nanotechnologies? », Paper prepared for the workshop on the history and philosophy of artificial life and intelligence, 4-5 octobre 2003.
- BETTER REGULATION TASK FORCE (Royaume-Uni), *Scientific Research, Innovation with Controls*, janvier 2003 [en ligne] <http://www.brc.gov.uk/downloads/pdf/scientificresearch.pdf>.
- BIOFUTUR, *Dossier : Nanotechnologies, des avancées pour les sciences du vivant*, n° 249, novembre 2004 [en ligne] <http://www.biofutur.com/>.
- BRITISH STANDARDS – BSI, *Vocabulary – Nanoparticles*, Publicly available specifications PAS 71 :2005, 25 mai 2005 [en ligne] <http://wolcott.respark.wsu.edu/manila/gems/swst/UKPAS71.pdf>.
- BULLETIN INVEST-QUÉBEC, Dossier Nanotechnologie, vol. 11, n° 3, septembre 2004 [en ligne] http://www.investquebec.com/documents/fr/bulletinsiq/bulletiniq_fr_septembre2004.pdf.
- BULLIS, Kevin, « Can Nanotech Be Regulated? », *Technology Review*, 23 janvier 2006 [en ligne] http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=16176&ch=nanotech.

- CABLE, Josh, « Does Asbestos Hold the Key for Understanding Nanotechnology Risks? », *Occupational Hazards*, 18 octobre 2005 [en ligne] <http://occupationalhazards.com/articles/14189>.
- CAPLAN, Arthur, « The Brain Revolution and Ethics », *The Scientist*, vol. 16, n° 21, 2002 [en ligne] <http://www.godlessgeeks.com/LINKS/BrainEthics.htm>.
- CASTLE, David, Roddy LOEPPKY et Marc SANER, *Convergence in Biotechnology Innovation: Case Studies and Implications for Regulation*, University of Guelph, février 2006 [en ligne] http://www.gels.ca/documents/ConvergentBiotechnology2Mb_000.pdf.
- CECCHELLI, Roméo, « Physiopathologie de la barrière hémato-encéphalique », Blood-Brain Barrier Laboratory, Rapport de recherche 2001, Unité mixte, Institut Pasteur de Lille, Université d'Artois [en ligne] [http://www.pasteur-lille.fr/fr/recherche/pdf/RapRech2001\(BHE\).pdf](http://www.pasteur-lille.fr/fr/recherche/pdf/RapRech2001(BHE).pdf).
- CHAIRE DE RESPONSABILITÉ SOCIALE ET DE DÉVELOPPEMENT DURABLE, « Mémoire », remis à la Commission des transports et de l'environnement dans le cadre des consultations particulières et des auditions publiques sur la Loi sur le développement durable (projet de loi n° 118), version révisée, *Les cahiers de la Chaire – collection Recherche* n° 10-2005 <http://www.crsdd.uqam.ca/pdf/pdfCahiersRecherche/10-2005.pdf>
- CHAJMOWICS, Marion, Pascal CORDIER et Nicolas MARRO, « Nanobiotechnologies et brevets: la propriété industrielle face à une technologie en pleine émergence », *Biofutur*, n° 258, septembre 2005 [en ligne] <http://www.biofutur.com/>.
- CHEMICAL INDUSTRY VISION 2020 TECHNOLOGY PARTNERSHIP, *Nanomaterials and the Chemical Industry R&D Roadmap Workshop – Preliminary Results*, octobre 2002 [en ligne] http://www.energetics.com/download/chemvision2020/nanomaterialsroadmap/nano_workshop_results_report.pdf.
- CHEMICAL INDUSTRY VISION 2020 TECHNOLOGY PARTNERSHIP, *Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials by Design: From Fundamentals to Function*, décembre 2003 [en ligne] http://www.chemicalvision2020.org/pdfs/nano_roadmap.pdf.
- CHEN, Andrew, *The Ethics of Nanotechnology*, Markkula Center for Applied Ethics, Santa Clara University, mars 2002 [en ligne] <http://www.actionbioscience.org/newfrontiers/chen.html>.
- CHESNAIS, Laurence et Florence PIJAUDIER-CABOT, « Nanotechnologies – les promesses de l'infiniment petit », *Industries*, Cahier Industries, n° 101, janvier 2005 [en ligne] <http://www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/kiosque/cahiers/pdf/c101.pdf>.
- COLVIN, Vicki L., « Responsible Nanotechnology: Looking beyond the Good News », *Eurekalert! Nanotechnology in Context*, novembre 2002 [en ligne] <http://www.eurekalert.org/context.php?context=nano&show=essays&essaydate=1102>
- COLVIN, Vicki L., « The Potential Environmental Impact of Engineered Nanomaterials », *Nature Biotechnology*, vol. 21, n° 10, octobre 2003 [en ligne] <http://www.nature.com/nbt/journal/v21/n10/full/nbt875.html;jsessionid=F697E1EA3E758692599B91797E16B6F5>.
- COLVIN, Vicki L., « Sustainability for Nanotechnology », *The Scientist*, vol. 18, n° 16, 30 août 2004 [en ligne] <http://www.the-scientist.com/2004/08/30/26/1/>.
- COMMISSION EUROPÉENNE, *La nanotechnologie – l'innovation pour le monde de demain*, Information générale, Luxembourg, Office des publications officielles des Communautés européennes, 2004 [en ligne] http://www.eurosfair.prdd.fr/7pc/doc/1147247623_nano_brochure_fr.pdf.
- CORNING, Peter A., « “Smart Machines” as Philosopher Kings », *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 71, 2004.

- COUVREUR, Patrick et Jean-Claude MOUNOLOU, « Diagnostic et thérapie : la révolution des nanotechnologies », *Vivant. L'actualité des sciences et débats sur le vivant*, non daté [en ligne] <http://www.vivantinfo.com/index.php?id=85>.
- DANDOLOPARTNERS (Australie), *Nanotechnology: National Business Interviews*, Detailed Report, 2005 [en ligne] <http://www.industry.gov.au/assets/documents/itrinternet/busurveyfinal20051020124149.pdf>.
- DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY – Darpa (États-Unis), *Bridging the Gap Powered by Ideas*, février 2005 [en ligne] <http://stinet.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA433949>.
- DEMERS, Nicolas, *Les Affaires*, section spéciale « Nanotechnologies », cahier B, 18 septembre 2004.
- DEMERS, Nicolas et Lise BERGERON, « Jouer avec la matière », *Protégez-vous*, octobre 2005.
- DIEKMAYER, Peter, « La nanotechnologie : le Québec a de grandes ambitions », *Bulletin Invest-Québec*, Dossier 1, vol. 11, n° 3, septembre 2004 [en ligne] <http://www.investquebec.com/fr/index.aspx?b=3&page=1567>.
- DREXLER, K. Eric, « Nanotechnology: From Feynman to Funding », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, février 2004.
- DUNKLEY, Robert W.S., « Nanotechnology: Social Consequences and Future Implications », *Futures – The Journal of Policy Planning and Futures Studies*, vol. 36, n° 10, 2004.
- DUPUY, Jean-Pierre, « Complexity and Uncertainty », first incomplete draft, UNESCO, janvier 2004 [en ligne] http://portal.unesco.org/ci/fr/file_download.php/00a816df74fbca78a22578dadcf862f2Dupuy2.pdf.
- DUPUY, Jean-Pierre, « Pour une évaluation normative du programme nanotechnologique », *La lettre de Prospective*, Groupe de prospective du Sénat, France, 12 juillet 2004 [en ligne] http://www.prospective.org/gps_front/index.php?rubrique_id=12&tpl_id=2&contenu_id=441&id=612&lettre.
- DUPUY, Jean-Pierre, « Quand les technologies convergeront », *Futuribles*, n° 300, septembre 2004 [en ligne] <http://www.2100.org/Nanos/NanosJPDJR.rtf>.
- DUPUY, Jean-Pierre et Alexei GRINBAUM, « Living with Uncertainty: Toward the Ongoing Normative Assessment of Nanotechnology », *Techné: Research in Philosophy and Technology*, vol. 8, n° 2, 2004 [en ligne] <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v8n2/pdf/grinbaum.pdf>.
- EBBESEN, Mette, « A Journey into the World of Atoms and Molecules », *Journal of Lutheran Ethics* (JLE), vol. 6, n° 2, février 2006 [en ligne] <http://www.inano.dk/sw6992.asp>.
- EBBESEN, Mette et Svend ANDERSEN, « Nanoethics: General Principles and Christian Discourse », *Journal of Lutheran Ethics* (JLE), vol. 6, n° 2, février 2006 [en ligne] <http://www.elca.org/scriptlib/dcs/jle/>.
- ELOY, Jean-Christophe, « Micro & Nano Technologies toward Life Science Applications », *Micronews*, Yole Development, Communication présentée à NanoQuébec le 9 mars 2006 [en ligne] http://www.nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/fiche/5288.
- ETC GROUP – EROSION, TECHNOLOGY AND CONCENTRATION, « Mulch ado about nothing?... Or the “Sand Witch?” Environmental use of “nanotechnology” highlights regulatory inadequacies and lack of clarity in the nanotech industry », Communiqué n° 81, septembre-octobre 2003 [en ligne] <http://www.etcgroup.org/documents/ComSandWitchFINAL.pdf>.
- EUROPEAN COMMISSION, *Workshop Report – European Workshop on Social and Economic Issues of Nanotechnologies and Nanosciences*, Peter Healey et Hans Gilmell (dir.), Research Directorate General, 2004 [en ligne] ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/elsa_nano_workshop_report.pdf.
- EUROPEAN PARLIAMENT, « Nanotechnology », septembre 2004 [en ligne] http://www.europarl.europa.eu/stoa/ta/nanotechnology/default_en.htm.

- EUROPEAN SCIENCE FOUNDATION, *Nanomedicine*, An EST-European Medical Research Councils (EMRC) Forward Look Report, novembre 2005 [en ligne] <http://www.esf.org/publication/214/Nanomedicine.pdf>.
- FEIGENBAUM, Dina, Albert NSAMIRIZI et Bernard SINCLAIR-DESGAGNÉ, « Les nanotechnologies : leurs bénéfices et leurs risques potentiels », CIRANO – Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, Série Scientifique, 2004s-44, Montréal, septembre 2004 [en ligne] <http://cirano.qc.ca/pdf/publication/2004s-44.pdf>.
- FREITAS, Robert A. Jr., *Nanomedicine, Volume IIA : Biocompatibility*, Section 15.3.2.1 Pure Carbon Fullerenes and Nanotubes, Landes Bioscience, Georgetown, 2003 [en ligne] <http://www.nanomedicine.com/NMIIA/15.3.2.1.htm>.
- FUKUYAMA, Francis, *Our Posthuman Future : Consequences of the Biotechnology Revolution*, New York, Farrar, Strauss and Giroux, 2002.
- GAIDOS, Susan, « Time to Regulate Nanoparticle Safety? » *The Scientist*, vol. 19, n° 15, 1^{er} août 2005 [en ligne] <http://www.the-scientist.com/article/display/15659/>.
- GASKELL, George *et al.*, « Enhanced : Social Values and the Governance of Science », *Science*, vol. 310, n° 5756, 23 décembre 2005 [en ligne] <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/310/5756/1908.pdf>.
- GAUTIER, J., « Les nanotechnologies pour l'information et la communication », *Annales des Mines, Réalités industrielles*, février 2004.
- GODARD, Olivier, « Le principe de précaution et la proportionnalité face à l'incertitude scientifique », *Rapport public 2005 : jurisprudence et avis de 2004. Responsabilité et socialisation du risque*, Conseil d'État, Paris, La Documentation française, 2005 [en ligne] <http://ceco.polytechnique.fr/CDD/CAHIERS/index.html>.
- GORDIJN, Bert, « Des rêves utopiques et des cauchemars apocalyptiques à une vue plus pondérée sur la nanotechnologie », *COMEST – Troisième Session, Rio de Janeiro, Brésil*, 1-4 décembre 2003, Actes, UNESCO [en ligne] <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001343/134391fo.pdf>.
- GORDON, Neil, « Nanotechnology for Military Applications », *Disruptive S&T Concepts for the New Military*, Canadian NanoBusiness Alliance, DRDC Science & Technology Symposium 2005, 19 avril 2005, présentation PowerPoint [en ligne] <http://www.drdc-rddc.gc.ca/newsevents/events/sympo05/13.pdf>.
- GORDON, Neil et Uri SAGMAN, *Nanomedicine Researchers in Canada*, Canadian NanoBusiness Alliance, Institute of Neurosciences, Mental Health and Addiction, février 2003 [en ligne] [http://www.regenerativemedicine.ca/nanomed/Nanomedicine%20Researchers%20in%20Canada%20\(Feb%202003\).PDF](http://www.regenerativemedicine.ca/nanomed/Nanomedicine%20Researchers%20in%20Canada%20(Feb%202003).PDF).
- GORDON, Neil et Uri SAGMAN, *Nanomedicine Taxonomy*, Briefing Paper, Canadian NanoBusiness Alliance, Institute of Neurosciences, Mental Health and Addiction, février 2003 [en ligne] [http://www.regenerativemedicine.ca/nanomed/Nanomedicine%20Taxonomy%20\(Feb%202003\).PDF](http://www.regenerativemedicine.ca/nanomed/Nanomedicine%20Taxonomy%20(Feb%202003).PDF).
- GORSS, Jason B. et Bruce V. LEWENSTEIN, *The Saliency of Small : Nanotechnology Coverage in the American Press, 1986-2004*, Media and Society Research Group (MSRG), 2004 [en ligne] <http://www.people.cornell.edu/pages/jbg37/NanoMediaICA2005.pdf>.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, *Une perspective canadienne sur l'approche/principe de précaution*. Principes directeurs proposés, septembre 2001 [en ligne] <http://www.pco-bcp.gc.ca/raoics-srdc/docs/precaution/Booklet/livret-f-allfonts.pdf>.
- GROGNET, Jean-Marc, « Les nano-biotechnologies », *Annales des Mines, Réalités industrielles*, février 2004. Exposé du président de l'Académie des technologies, HEC Eurasia Institute, 2 février 2006.
- GUTIERREZ, Eva, « Privacy Implications of Nanotechnology », Electronic Privacy Information Center, printemps 2004 [en ligne] <http://www.epic.org/privacy/nano/>.

- HALFORD, Bethany, « Nano Dictionary. Scientists Hope That a Standard System for Naming Nanomaterials will Put Everyone on the Same Page », *Chemical & Engineering News*, 6 avril 2005 [en ligne] <http://pubs.acs.org/cen/news/83/i14/8314esci2.html>.
- HANSSON, Sven Ove, « Great Uncertainty about Small Things », *Techné*, vol. 8, n° 2, hiver 2004 [en ligne] <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v8n2/pdf/hansson.pdf>.
- HATTON, Anne-Catherine, « Neurosciences, nanotechnologies et éthique : un état des lieux », manuscrit, Faculté de droit, Université Laval, avril 2004.
- HAUPTMAN, Aharon et Yair SHARAN, *Envisioned Developments in Nanobiotechnology. Expert Survey. Summary of Results*, Nano2Life, Interdisciplinary Center for Technology Analysis and Forecasting (ICTAF) at Tel-Aviv University, décembre 2005 [en ligne] http://www.ictaf.tau.ac.il/N2L_expert_survey_results.pdf.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (Royaume-Uni), *Health Effects of Particles Produced for Nanotechnologies*, décembre 2004 [en ligne] <http://www.hse.gov.uk/horizons/nanotech/healtheffects.pdf>.
- HEALTH AND SAFETY LABORATORY (Royaume-Uni), *Nanomaterials – A Risk to Health at Work?*, First International Symposium on Health Implications of Nanomaterials 12-14 October 2004, David Mark (Chair), Report of Presentations at Plenary and Workshop Sessions and Summary of Conclusions, octobre 2004 [en ligne] http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymrep_final.pdf.
- HOET, Peter H.M., Irene BRÜSKE-HOHLFELD et Oleg V. SALATA, « Nanoparticles – Known and Unknown Health Risks », *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 2, n° 12, décembre 2004 [en ligne] <http://www.jnanobiotechnology.com/content/2/1/12>.
- HOLISTER, Paul et Tim E. HARPER, *The Nanotechnology Opportunity ReportTM*, vol. 1 et 2, CMP Scientífica, mars 2002.
- HOUSE OF COMMONS (Royaume-Uni), *Too Little too Late? Government Investment in Nanotechnology*, Fifth Report of Session 2003-2004, Vol. 1, Science and Technology Committee, 2 avril 2004 [en ligne] <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200304/cmselect/cmsctech/56/56.pdf>.
- HUNT, Warren H. Jr., « Nanomaterials: Nomenclature, Novelty, and Necessity », *JOM: The Member Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, octobre 2004 [en ligne] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0410/Hunt-0410.html>.
- IRISH COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION – ICSTI, *ICSTI Statement on Nanotechnology*, Dublin, 14 juillet 2004 [en ligne] <http://www.forfas.ie/icsti/statements/icsti040714/index.html>.
- JAMES A. BAKER III INSTITUTE FOR PUBLIC POLICY, *Energy and Nanotechnology: Strategy for the Future*, Conference Report, Rice University, février 2005 [en ligne] http://bakerinstitute.org/Pubs/study_30.pdf.
- JOACHIM, Christian, « To be nano or not to be nano? », Commentary, *Nature Materials*, vol. 4, février 2005.
- JOHNSON, Linda A., « Nano-based products starting to have consumer impact », *USA Today*, 8 novembre 2004 [en ligne] http://www.usatoday.com/tech/news/nano/2004-11-08-nano-on-the-move_x.htm?POE=click-refer.
- KANELLOS, Michael, « Human chips more than skin-deep », *CNET News.com*, 23 août 2004 [en ligne] <http://zdnet.com.com/2100-1103-5319869.html>.
- KATZ, E., R. LOVEL et F. SOLOMON, *Citizens' Panel on Nanotechnology*, Report to participants, DMR-2673, CSIRO Minerals, Melbourne, Australie, avril 2005 [en ligne] http://www.minerals.csiro.au/sd/pubs/Citizens_Panel_Report_to_Participants_April_2005_final_110.pdf.

- KINNARD, Nathalie, « Maîtriser l'infiniment petit », *Découvrir*, novembre-décembre 2004 [en ligne] http://www.vrq.qc.ca/images/documents/2600-002%20Maîtriser%20l%27inf_petit.pdf.
- KNOL, W.H.C., « Nanotechnology and Business Opportunities : Scenarios as Awareness Instrument », communication dans le cadre de la 12^e conférence internationale annuelle, “High Technology Small Firms”, Enschede, the Netherlands, mai 2004 [en ligne] <http://129.3.20.41/eps/io/papers/0501/0501003.pdf>.
- LAING, Andrew, « A Report on Canadian and American News Media Coverage of Nanotechnology Issues », *The Innovation Society. Nano Safety, Risk & Regulation*, Cormex Research, janvier 2006 [en ligne] http://www.innovationsgesellschaft.ch/images/fremde_publicationen/report_on_CAN_US.pdf.
- LANE, Neal et Thomas KALIL, « The National Nanotechnology Initiative: Present at the Creation », *Issues in Science and Technology*, été 2005 [en ligne] <http://www.issues.org/21.4/lane.html>.
- LAURENT, Louis et Jean-Claude PETIT, « Nanosciences : nouvel âge d’or ou apocalypse ? », Réflexion, Département de recherche sur l’état condensé, les atomes et les molécules (Drecam) du Commissariat à l’Énergie atomique de France, 19 juillet 2004 [en ligne] <http://www.cea.fr/fr/sciences/nanosciences.htm>.
- LAURENT, Louis et Jean-Claude PETIT, « Nanosciences and its Convergence with other Technologies. New Golden Age or Apocalypse ? », *Hyle – International Journal for Philosophy of Chemistry*, Special Issue on “Nanotech Challenges”, vol. 11, n° 1, 2005 [en ligne] <http://www.hyle.org/journal/issues/11-1/petit-laurent.htm>.
- LE MAROIS, Gilles et Dominique CARLAC’H, « Les nano-matériaux, au cœur de la galaxie nano », *Annales des Mines, Réalités industrielles*, février 2004.
- LEWENSTEIN, Bruce V., « What Counts as a “Social and Ethical Issue” in Nanotechnology ? », *Hyle – International Journal for Philosophy of Chemistry*, Special Issue on “Nanotech Challenges”, vol. 11, n° 1, 2005 [en ligne] <http://www.hyle.org/journal/issues/11-1/lewenstein.htm>.
- LUX RESEARCH, « Revenue from Nanotechnology-Enabled Products to Equal IT and Telecom by 2014, Exceed Biotech by 10 Times », *Yahoo! Finance*, 25 octobre 2004 [en ligne] http://www.luxresearchinc.com/press/RELEASE_SizingReport.pdf.
- LUX RESEARCH, *The Nanotech Report 2004TM*, Investment Overview and Market Research for Nanotechnology, 3rd ed., vol. I (Key findings and introduction), 2004 [en ligne] <https://www.globalsalespartners.com/lux/>.
- MACDONALD, Chris, « Nanotechnology, Privacy and Shifting Social Conventions », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004 [en ligne] http://www.law.ualberta.ca/centres/hli/pdfs/hlr/v12_3/12-3-09%20MacDonald.pdf.
- MASCIANGIOLI, Tina et Wei-Xian ZHANG, « Environmental Technologies at the Nanoscale », *Environmental Science & Technology*, 1^{er} mars 2003 [en ligne] http://www.nano.gov/html/res/GC_ENV_PaperZhang_03-0304.pdf.
- MAZZOLA, Laura, « Commercializing Nanotechnology », *Focus, Nature Biotechnology*, vol. 21, n° 10, octobre 2003 [en ligne] <http://bimat.princeton.edu/assets/publicity/NatureBiotechnology2003/october2003.pdf>.
- MCINTYRE, Terry, *Preliminary Results from Global Scan of Environmental Dimensions of Nanotechnology. A Progress Report*, presented to Alberta Environmental Services Community, 8-9 décembre 2004, présentation PowerPoint.
- McKIBBEN, Bill, *Enough. Staying Human in an Engineered Age*, New York, Times Books, 2003.
- MEE, Wendy *et al.*, *Nanotechnology: The Bendigo Workshop*, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Minerals, Rapport DMR-2561, octobre 2004 [en ligne] <http://www.minerals.csiro.au/sd/pubs/Public%20report.pdf>.
- MEHTA, Michael D., « On Nano-Panopticism: A Sociological Perspective », *Canadian Chemical News*, Interfaces, n° 5, novembre-décembre 2002 [en ligne] <http://chem4823.usask.ca/~cassidy/OnNano-Panopticism-ASociologicalPerspective.htm>.

- MEHTA, Michael D., « Some thoughts on the Economic Impacts of Assembler-era Nanotechnology », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004 [en ligne] http://www.law.ualberta.ca/centres/hli/pdfs/hlr/v12_3/12-3-08%20Mehta.pdf.
- MILLER, John, « Beyond Biotechnology: FDA Regulation of Nanomedicine », *The Columbia Science and Technology Law Review*, vol. IV, 2003 [en ligne] <http://www.stlr.org/cite.cgi?volume=4&article=5>.
- MINISTÈRE DE LA JEUNESSE, DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA RECHERCHE (France), *Le financement des nanotechnologies et des nanosciences. L'effort des pouvoirs publics en France. Comparaisons internationales*, rapport n° 2004-002, janvier 2004 [en ligne] <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/044000118/0000.pdf>.
- MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France), *Nanosciences et Nanotechnologies. Une réflexion prospective*, mai 2005 [en ligne] http://www.recherche.gouv.fr/mstp/nano_mstp2005.pdf.
- MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À LA RECHERCHE ET AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES (France), *Santé-environnement et santé-travail. Nouvelles perspectives de recherches*, Document d'orientation scientifique, Séminaire de prospective scientifique et de lancement du programme recherche du Plan national santé-environnement et du Plan santé-travail, 31 mars et 1^{er} avril 2005 [en ligne] <http://www.gip-anr.fr/actu/dpsante31mars.pdf>.
- MONTPETIT, Éric et Christian ROUILLARD, « Democracy and Cultures of Biotechnology Risk Management: The Widening Gap between Canada and France », Communication présentée lors du symposium Emerging Issues and Challenges in Public Policy, Département de science politique, Université Concordia, Montréal, jeudi 24 mars 2005.
- MOORE, Fionna N. « Implications of Nanotechnology Applications: Using Genetics as a Lesson », *Health Law Review*, vol. 10, n° 3, 2002 [en ligne] www.law.ualberta.ca/centres/li/pdfs/hlr/10.3moorefrm.pdf.
- NANOFORUM.ORG. EUROPEAN NANOTECHNOLOGY GATEWAY, *Nanotechnology and Its Implications for the Health of the EU Citizen*, décembre 2003 [en ligne] http://www.nanoforum.org/nf06~modul~showmore~folder~99999~sci d~162~.html?action=longview_publication&.
- NANOFORUM.ORG. EUROPEAN NANOTECHNOLOGY GATEWAY, *Outcome of the Open Consultation on the European Strategy for Nanotechnology*, décembre 2004 [en ligne] <http://nano-and-society.org/NELSI/documents/ECnanoforum1204.pdf>.
- NANOTECHNOLOGY VICTORIA (Australie), *Nanotechnology and Australian Business*, Results of an industry survey conducted by Nanotechnology Victoria for the 2nd Australian Nanotechnology Conference, Melbourne, 26-28 septembre 2005 [en ligne] <http://www.industry.gov.au/assets/documents/itrinternet/SurveyBrochure20051021095746.pdf>.
- NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH (États-Unis), *Socio-Economic Impact of Nanoscale Science: Initial Results and Nanobank*, Lynne G. Zucher et Michael R. Darby, NBER Working Paper Series, Working Paper 11181, mars 2005 [en ligne] <http://www.nber.org/papers/w11181>.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH – NIOSH (États-Unis), *Approaches to Safe Nanotechnology. An Information Exchange with NIOSH*, Centers for Disease Control and Prevention, 1^{er} octobre 2005 [en ligne] http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/nano_exchange.html.
- NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH (États-Unis), *Statement for the Record on Nanotechnology*, Department of Health and Human Services, 1^{er} mai 2003 [en ligne] <http://www.nano.gov/html/res/SchlossNIHCongTest03.pdf>.
- NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL (États-Unis), *Shaping the World Atom by Atom*, Committee on Technology, The Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, septembre 1999 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/>.
- NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL (États-Unis), *Nanobiotechnology*, Report of the National Nanotechnology Initiative Workshop October 9-11, 2003, Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee [en ligne] http://www.nbtc.cornell.edu/downloads/nni_nanobiotechnology_rpt.pdf.

- NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL (États-Unis), *The National Nanotechnology Initiative*, Strategic Plan, Developed by the Nanoscale Science, Engineering and Technology Subcommittee, Committee on Technology, décembre 2004 [en ligne] <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>.
- NORMAND, Christian, « Revue de littérature. Dans le cadre de la préparation d'un guide des bonnes pratiques pour les compagnies en nanomatériaux », rapport remis à NanoQuébec, 12 janvier 2005.
- NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, *Pharmacogenetics: Ethical Issues*, Londres, 20 septembre 2003 [en ligne] http://www.nuffieldbioethics.org/go/print/ourwork/pharmacogenetics/publication_314.html.
- OBERSON-GENESTE, Dominique, « Les particules ultrafines : qui sont-elles, où sont-elles et que font-elles ? », *Poussières minérales et Santé*, n° 6, janvier 2003 [en ligne] <http://www.ineris.com/index.php?module=doc&action=getFile&id=33>.
- ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES – OCDE, *Les technologies du XXI^e siècle. Promesses et périls d'un futur dynamique*, Paris, 1998.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE, *Proposition de l'Argentine et du Brésil en vue de l'établissement d'un plan d'action de l'OMPI pour le développement*, Assemblée générale de l'OMPI, Trente-et-unième session, Genève, 27 septembre-5 octobre 2004 [en ligne] http://www.wipo.int/documents/fr/document/govbody/wo_gb_ga/doc/wo_ga_31_11.doc.
- PAUTRAT, Jean-Louis, *Demain le nanomonde. Voyage au cœur du minuscule*, Paris, Fayard, coll. Le temps des sciences, 2002.
- PERKEL, Jeffrey M., « The Ups and Downs of Nanobiotech », *The Scientist*, vol. 18, n° 16, 30 août 2004.
- PERPICH, Joseph G., « The dawn of genomic and regenerative medicine: new paradigms for medicine, the public's health, and society », *Technology in Society*, vol. 26, n° 2, 2004.
- PILARSKI, Linda M. *et al.*, « Microsystems and Nanoscience for Biomedical Applications: A View to the Future », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004 [en ligne] <http://www.nanoandsociety.com/ourlibrary/documents/pilarski-mehta-feb2004.pdf>.
- POLLACK, Andrew, « With tiny brain implants, just thinking may make it so », *The New York Times*, 13 avril 2004 [en ligne] www.nytimes.com/2004/04/13/health/13BRAI.html.
- POLLARA, *Sondage d'opinion publique sur les technologies émergentes [sic]*, rapport préparé pour le comité de coordination des sous-ministres adjoints chargés de la biotechnologie, Gouvernement du Canada, Toronto, mars 2004 [en ligne] <http://www.biostrategie.gc.ca/francais/View.asp?pmiid=524&x=670>.
- PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (États-Unis), *Nanotechnology Initiative. Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Industry*, Supplement to the President's FY 2006 Budget, Washington, D.C., mars 2005 [en ligne] http://www.nano.gov/NNI_06Budget.pdf.
- PROGRAM MANAGER UNIT OF ACTION (États-Unis), *Future Combat Systems, 18 + 1 + 1 Systems Overview*, White Paper, Version 19, 29 septembre 2005 [en ligne] [http://www.army.mil/fcs/whitepaper/FCSWhitePaper\(v19_29Sep05\).doc](http://www.army.mil/fcs/whitepaper/FCSWhitePaper(v19_29Sep05).doc).
- QUEREL, Arnaud, « Nanobilles ferromagnétiques : l'avenir thérapeutique ? », *Biofutur*, vol. 23, n° 248, 2004.
- RADIO-CANADA, « La nanotechnologie », reportage à l'émission *Découverte*, 11 mai 2003 [en ligne] <http://www.radio-canada.ca/actualite/decouverte/reportages/2003/05-2003/03-05-09/nano.html>.
- RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT POUR LA DÉFENSE CANADA – RDDC, *Stratégie d'investissement technologique (SIT)*, dans le contexte des mesures de sécurité en pleine évolution à travers le monde, 2002 [en ligne] http://www.drdc-rddc.gc.ca/publications/tis02_f.pdf.

- REGIS, Ed, « The Incredible Shrinking Man », *Wired Magazine*, octobre 2004 [en ligne] http://www.wired.com/wired/archive/12.10/drexler_pr.html.
- REYNOLDS, Glenn Harlan, *Forward to the Future: Nanotechnology and Regulatory Policy*, Pacific Research Institute, novembre 2002 [en ligne] http://www.pacificresearch.org/pub/sab/techno/forward_to_nanotech.pdf.
- RICKLING, Stéphane et Luc LEBEAU, « Biologie, chimie et nanomatériaux », *Biofutur*, numéro sur « Nanobiotechnologies : des avancées pour les sciences du vivant », vol. 23, n° 249, novembre 2004.
- RINCON, Paul, « Test Could Spot Alzheimer's Early », *BBC News*, 12 novembre 2004 [en ligne] <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/4003593.stm>.
- ROBERT, Jean-Louis, « Les nanosciences, à l'intersection des sciences fondamentales et des technologies », *Annales des Mines, Réalités industrielles*, février 2004.
- ROBISON, Wade L., « Nano-Ethics », dans D. Baird, A. Nordmann et J. Schummer (dir.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam, IOS Press, 2004 [en ligne] <http://cms.ifs.tu-darmstadt.de/fileadmin/phil/nano/robison.pdf>.
- ROCHON, Michel, « L'éthique dans l'univers des nanotechnologies », *L'Observatoire de la génétique*, n° 12, juin 2003 [en ligne] http://www.ircm.qc.ca/bioethique/obs/genetique/zoom/zoom_03/z_no12_03/z_no12_03_01.html.
- ROCO, M.C., « Broader societal issues of nanotechnology », *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 2003 [en ligne] <http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/BroaderSocIssue.pdf>.
- ROCO, Mihail C. et William Sims BAINBRIDGE (dir.), *Nanotechnology: Societal Implications – Maximizing Benefits for Humanity*, Report of the National Nanotechnology Initiative Workshop December 3-5, 2003, Arlington, Virginia [en ligne] http://www.nano.gov/nni_societal_implications.pdf.
- ROSEMAN, Mark, *An Overview of Nanotechnology in Canada. Report 1: Environmental Scan of the Current State of Play*, sponsored by the Prime Minister's Advisory Council on Science and Technology (PMACST), Canada, 10 août 2005 [en ligne; disponible sur demande] http://acst-ccst.gc.ca/back/home_f.html.
- SALAMANCA-BUENTELLO, Fabio *et al.*, « Nanotechnology and the Developing World », *PLoS Medicine*, Policy Forum, vol. 2, n° 4, avril 2005 [en ligne] http://www.utoronto.ca/jcb/home/documents/PLoS_nanotech.pdf.
- SALATA, OV, « Applications of Nanoparticles in Biology and Medicine. Review », *Journal of Nanobiotechnology*, vol. 2, n° 3, avril 2004 [en ligne] <http://www.jnanobiotechnology.com/content/pdf/1477-3155-2-3.pdf>.
- SAMSON BÉLAIR DELOITTE & TOUCHE, *Development of a Québec Nanotechnology*, 2002.
- SAMSON BÉLAIR DELOITTE & TOUCHE, *Development of a Québec Nanotechnology Strategy*. Phase 1 – Interim Report 2. Results of the university researchers survey, 17 décembre 2002.
- SANDBERG, Anders, *Smurfy Nanoethics*, 16 octobre 2004 [en ligne] http://www.eudoxa.se/content/archives/2004/10/smurfy_nanoethi_1.html.
- SANDBERG, Anders, « Give Nanotechnology [sic] a Chance. Another Target for Radical Environmentalists », *Frontier Centre for Public Policy*, 23 janvier 2004 [en ligne] http://www.fcpp.org/main/publication_detail.php?PubID=686.
- SARGENT, Ted, *The Dance of Molecules. How Nanotechnology is Changing Our Lives*, Ontario, Viking Canada, 2005.
- SCHMIDT, Ken *et al.*, *Nanotechnology in the Environment Industry: Opportunities and Trends*, Final Report and Bibliography for the Nano-Environmental Cross-Sector Initiative, Environmental Services Association of Alberta, 4 mars 2005 [en ligne] [http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/\\$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf](http://www.esaa.org/abedmesa/doc.nsf/files/F3A8DABC57869C1B8725701400744689/$file/ESAA_Nano-Enviro_Final_Report_04Mar2005.pdf).

- SCHUMMER, Joachim, « "Societal and Ethical Implications of Nanotechnology": Meanings, Interest Groups, and Social Dynamics », *Techné: Journal of the Society for Philosophy and Technology*, vol. 8, n° 2, hiver 2004 [en ligne] <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v8n2/schummer.html>.
- SCOTT, N.R., « Nanotechnology and Animal Health », *Revue scientifique et technique* de l'Office international des épizooties, vol. 24, n° 1, 2005 [en ligne] <http://www.oie.int/eng/publicat/RT/2401/24-1%20pdfs/36-scott425-432.pdf>.
- SECRÉTARIAT CANADIEN DE LA BIOTECHNOLOGIE, *Les technologies naissantes: recherche sur l'opinion publique au Canada et aux États-Unis. Constataions*, 31 mars 2005 [en ligne] <http://www.biostrategie.gc.ca/CMFiles/F-Wave13FG46QLR-632005-8181.pdf>.
- SECRÉTARIAT CANADIEN DE LA BIOTECHNOLOGIE, Résultats des sondages effectués au Canada et aux États-Unis, Recherche de l'opinion publique internationale sur les technologies émergentes, PowerPoint, mars 2005 [en ligne] http://www.biostrategie.gc.ca/CMFiles/F-POR-ET_200549QDR-5202005-4958.pdf.
- SEEMAN, Nadrian C., « Nanotechnology and the Double Helix », *Scientific American*, juin 2004 [en ligne] <http://www.sciam.com/article.cfm?articleID=00056ED2-6201-10A9-A19983414B7F0000>.
- SINGER, Peter, *Questions d'éthique pratique*, Paris, Bayard Éditions, 1997.
- SMITH, Deborah, « Particles could pose health risks », *The Sydney Morning Herald*, 26 septembre 2005 [en ligne] <http://www.smh.com.au/news/national/particles-could-pose-health-risk/2005/09/25/1127586747268.html?from=moreStories>.
- SPRINGER HANDBOOK OF NANOTECHNOLOGY, Bharat BHUSHAN (dir.), Part F, « Social and Ethical Implication », Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2004.
- STIX, Gary, « Waiting for Breakthroughs », *Scientific American.com*, 1^{er} avril 2000 [en ligne] http://www.sciam.com/print_version.cfm?articleID=0003FBB1-6119-1C76-9B81809EC588EF21.
- SWEENEY, Aldrin E., Sudipta SEAL et Pallavoor VAIDYANATHAN, « The Promises and Perils of Nanoscience and Nanotechnology: Exploring Emerging Social and Ethical Issues », *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 23, n° 4, août 2003.
- THE ECONOMIC & SOCIAL RESEARCH COUNCIL (Royaume-Uni), *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology*, Stephen Wood, Richard Jones et Alison Geldart, non daté [en ligne] <http://www.shef.ac.uk/physics/people/rjones/PDFs/SECNanotechnology.pdf>.
- THE ECONOMIST, « The future of mind control », vol. 363, n° 8274, 25 mai 2002.
- THE ECONOMIST, « Small wonders. A survey of nanotechnology », vol. 374, n° 8407, 1^{er} janvier 2005.
- THE ENVIRONMENTAL FORUM, *No Small Task: Regulating Nanotechnology To Ensure Safety, Maximize Benefits*, The Environmental Law Institute, Washington, D.C. Reprinted by permission from The Environmental Forum, juillet/août 2005 [en ligne] http://www.lawbc.com/other_pdfs/nanotech%20forum.pdf.
- THE PRIME MINISTER'S SCIENCE, ENGINEERING AND INNOVATION COUNCIL – PMSSEIC (Australie), *Nanotechnology. Enabling Technologies for Australian Innovative Industries*, 11 mars 2005 [en ligne] http://www.dest.gov.au/sectors/science_innovation/publications_resources/profiles/nanotechnology_enabling_innovative_industries.htm.
- THE ROYAL SOCIETY (UK) AND THE SCIENCE COUNCIL OF JAPAN, « Report of a joint Royal Society – Science Council of Japan workshop on the potential health, environmental and societal impacts of nanotechnologies », 11 et 12 juillet 2005 [en ligne] <http://www.royalsoc.ac.uk/displaypagedoc.asp?id=17357>.
- THEODORE, Louis et Robert G. KUNZ, *Nanotechnology. Environmental Implications and Solutions*, New Jersey, Wiley-Interscience, 2005.

- TOFFOLETTO, Laurence, « LUCAS: une méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie spécifique au contexte canadien », *Cahiers scientifiques du CIRAIG*, vol. 1, n° 2, avril 2005 [en ligne] http://www.polymtl.ca/ciraig/CSc_V1_N2.pdf.
- TOUMEY, Christopher P., *Final Report on the South Carolina Citizen's School of Nanotechnology [SCCSN] for Spring 2004: an Outreach Program of the University of South Carolina*, 2004 [en ligne] http://nsts.nano.sc.edu/outreach/sccsn_s04_report.pdf.
- TOUMEY, Christopher P., « Narratives for Nanotech: Anticipating Public Reactions to Nanotechnology », *Techné*, vol. 8, n° 2, hiver 2004 [en ligne] <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v8n2/pdf/toumey.pdf>.
- TUCKER, Geoff, « Pharmacogenetics – Expectations and Reality », Editorial, *British Medical Journal*, vol. 329, 3 juillet 2004 [en ligne] <http://bmj.bmjjournals.com/cgi/content/full/329/7456/4>.
- UNIVERSITY OF MINNESOTA, *The Nanotechnology-Biology Interface: Exploring Models for Oversight*, Workshop Report, Jennifer Kuzma (dir.), Center for Science, Technology, and Public Policy, Hubert H. Humphrey Institute of Public Affairs, 15 septembre 2005 [en ligne] http://www.hhh.umn.edu/img/assets/9685/nanotech_jan06.pdf.
- VANDERBURG, Willem H., « Some Reflections on Teaching Biotechnology, Nanotechnology, and Information Technology », Editorial, *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 24, n° 1, février 2004 [en ligne] <http://bst.sagepub.com/content/vol24/issue1/>.
- VOYER, Normand, « Nanobiotechnologie: un présent débordant de promesses », *Bio Tendances*, Centre québécois de valorisation des biotechnologies (CQVB), vol. 1, n° 1, janvier 2003.
- WARIDEL, Laure, *L'envers de l'assiette*, Montréal, Les éditions Écosociété, 2003.
- WASSON, Andrew, « Protecting the Next Small Thing: Nanotechnology and the Reverse Doctrine of Equivalent », *Duke Law & Technology Review*, n° 10, 2004 [en ligne] <http://www.law.duke.edu/journals/dltr/articles/PDF/2004DLTR0010.pdf>.
- WEIL, Vivian, « Ethical Issues in Nanotechnology », *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, National Science Foundation, Arlington, Virginia, mars 2001 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/NSET.Societal.Implications/nanosi.pdf>.
- WEISS, Rick, « For science, nanotech poses big unknowns », *Washingtonpost.com*, 1^{er} février 2004 [en ligne] www.washingtonpost.com/ac2/wp-dyn/A1487-2004Jan31.
- WEISS, Rick, « Nanomedicine's Promise Is Anything but Tiny », *Washingtonpost.com*, 31 janvier 2005 [en ligne] <http://www.washingtonpost.com/ac2/wp-dyn/A49758-2005Jan30?language=printer>.
- WELLCOME TRUST, *Big Picture on Nanoscience*, n° 2, juin 2005 [en ligne]. <http://www.wellcome.ac.uk/assets/wtd015798.pdf>.
- WILSON, James et Rebecca WILLIS, *See-through Science. Why public engagement needs to move upstream*, Royaume-Uni, DEMOS, 2004.
- WOLFE, Josh, « Nanotechnology's Disruptive Future », *Forbes.com*, 21 octobre 2004 [en ligne] http://www.forbes.com/2004/10/21/cz_jw_1021soapbox_print.html.
- YU, Hans, *Nanotechnology Stewardship and the Management of Health Risks: Regulatory Oversight and Challenges*, Office of Biotechnology and Science, Santé Canada, NanoForum 2005, 15 juin 2005 [en ligne] <http://www.uofaweb.ualberta.ca/nanoforum/pdfs/HansYu.pdf>.
- ZACCAI, Edwin, « Développement durable », dans Gilbert Hottois et Jean-Noël Missa (dir.), *Nouvelle encyclopédie de bioéthique. Médecine. Environnement. Biotechnologie*, Bruxelles, Éditions DeBoeck Université, 2001.

Sites suggérés pour une information à jour sur la recherche et le développement des nanotechnologies*

Au Québec

NanoQuébec

NanoQuébec a pour mission de renforcer l'innovation en nanotechnologie en vue d'accroître le développement économique durable du Québec et du Canada.

http://www.nanoquebec.ca/nanoquebec_w/site/explorateur.jsp?currentlySelectedSection=72

Les nanotechnologies au Québec et dans le monde

Section consacrée aux nanotechnologies par le Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation du Québec.

http://www.mdeie.gouv.qc.ca/page/web/portail/scienceTechnologie/nav/technologies_strategiques/42648.html?iddoc=42648

Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)

Organisme de recherche scientifique qui vise à contribuer à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

<http://www.irsst.qc.ca/fr/accueil.html>

Au Canada

L'Institut national de la nanotechnologie

Institut de recherche intégré et pluridisciplinaire qui réunit des chercheurs des secteurs de la physique, de la chimie, du génie, de la biologie, de l'informatique, de l'industrie pharmaceutique et du monde médical, dont les travaux s'effectuent à l'échelle nanométrique à partir d'atomes et de molécules individuels. Établi en 2001, l'Institut est exploité en collaboration avec le Conseil national de recherches et l'Université de l'Alberta. (site en développement)

http://nint-innt.nrc-cnrc.ca/home/index_f.html

Plate-forme d'innovation du CRSNG en nanoscience et nanotechnologie (NanoPIC)

Réseau national multidisciplinaire de chercheurs universitaires œuvrant dans de nombreuses sphères des sciences et de la technologie, NanoPIC a pour objectif d'accélérer et d'intensifier la recherche et l'éducation d'un personnel hautement qualifié dans ces domaines au Canada.

<http://www.physics.mcgill.ca/NSERCnanoIP/f/#welcome>

* La Commission de l'éthique de la science et de la technologie ne prétend pas à l'exhaustivité en la matière et ne peut en aucun cas témoigner de la qualité de l'information véhiculée sur ces sites. Par ailleurs, il lui apparaît également important de signaler que le lecteur intéressé à se tenir au courant des actualités en nanotechnologie pourra, sur plusieurs sites, s'abonner à une lettre électronique.

Nanoforum Canada

Site du forum canadien annuel sur la nanoscience et la nanotechnologie.

<http://www.uofaweb.ualberta.ca/nanoforum/>

ETC Group : Action Group on Erosion, Technology and Concentration

Groupe d'intérêt qui soutient le développement socialement responsable des technologies et traite de questions de gouvernance mondiale et de pouvoir corporatif.

<http://www.etcgroup.org/en/issues/nanotechnology.html>

Aux États-Unis

National Nanotechnology Initiative (États-Unis)

Programme de R-D en nanotechnologies qui coordonne les activités en sciences, en génie et en technologie pour toutes les agences gouvernementales américaines.

<http://www.nano.gov/>

Nanotechnology at NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)

Section sur les nanotechnologies de l'organisme américain de santé et sécurité au travail.

<http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>

Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN)

La majorité des activités de recherche du CBEN à l'université Rice porte sur la bioingénierie, le génie environnemental et la recherche fondamentale ; mais le Centre s'interroge également sur les impacts sanitaires, environnementaux et sociaux des nanotechnologies et propose du matériel éducatif.

<http://www.ruf.rice.edu/%7Ecben/>

Nano Science and Technology Studies, Societal and Ethical Implications

Centre multidisciplinaire de l'université de la Caroline du Sud qui fait de la recherche et de la formation sur les dimensions sociales, épistémologiques et éthiques des nanotechnologies.

<http://nsts.nano.sc.edu/>

A Nanotechnology Consumer Product Inventory

Un inventaire réalisé par le Woodrow Wilson International Center for Scholars, qui donne une information à jour sur des produits issus des nanotechnologies et qui sont déjà commercialisés.

<http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>

The Institute for Soldier Nanotechnologies

Centre de recherche multidisciplinaire du Massachusetts Institute of Technology (MIT) qui a pour objectif d'améliorer de façon significative la survie des soldats grâce aux nanotechnologies.

<http://web.mit.edu/isn/>

Center on Nanotechnology and Society

Centre de recherche de l'Illinois Institute of Technology qui sert de catalyseur pour la recherche interdisciplinaire, l'éducation et le dialogue sur les questions éthiques, légales, politiques, commerciales et sociales que pose la nanotechnologie – avec une préoccupation particulière pour la condition humaine.

<http://www.nano-and-society.org/>

Nanotechnology Industries

Site qui vise à fournir de l'information et des ressources sur les nanotechnologies afin de favoriser la recherche, la communication et l'innovation en la matière.

<http://nanoindustries.com/links/>

Foresight Nanotech Institute

Organisme à but non lucratif dont l'objectif est de sensibiliser et de préparer la population à l'introduction des nanotechnologies et à leurs impacts anticipés.

<http://www.foresight.org/>

En Europe et à l'international

Nanotechnology Homepage of the European Commission

Aperçu des activités en nanotechnologies à travers les programmes de la Communauté européenne.

<http://www.cordis.lu/nanotechnology/>

Portail NanoSciences NanoTechnologies

Portail regroupant une description des actions, des projets en cours et des moyens mis en place en France en nanotechnologies.

<http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/>

Nanotechnology and Nanoscience

Ce site a été créé dans la foulée de la publication en Grande-Bretagne du rapport commun de la Royal Society et de la Royal Academy of Engineering sur les nanotechnologies et il inclut un forum de discussion.

<http://www.nanotec.org.uk/>

International Risk Governance Council (IRGC)

Fondation indépendante suisse qui a pour but de contribuer à améliorer l'anticipation et la gouvernance des risques globaux et systémiques; une section du site est consacrée aux nanotechnologies.

<http://www.irgc.org/irgc/projects/nanotechnology/>

Nanoforum.org: European Nanotechnology Gateway

Réseau qui vise à fournir de l'information sur les efforts européens en matière de nanotechnologie ainsi qu'à soutenir la communauté européenne à cet égard.

<http://www.nanoforum.org/>

Center for Responsible Nanotechnology (CRN)

La mission du CRN est, entre autres, de sensibiliser aux questions que soulèvent les nanotechnologies (bénéfices et risques) et à leur utilisation responsable.

<http://www.crnano.org/>

Nano Ethics

Organisation indépendante qui étudie les implications éthiques et sociales des nanotechnologies.

<http://www.nanoethics.org/>

Meridian Institute

Organisme dont l'objectif est d'accompagner les décideurs dans leur prise de décision concernant des enjeux importants en politique publique, dont ceux relatifs aux nanotechnologies.
<http://www.merid.org/projects.php#Nanotechnology>

International Council on Nanotechnology

Base de données relatives à la documentation scientifique portant sur l'évaluation des risques associés aux nanotechnologies pour l'environnement et la santé.
<http://icon.rice.edu/research.cfm>

Journal of Nanobiotechnology

Journal électronique qui publie des articles scientifiques dans les domaines des sciences médicales et biologiques ainsi qu'en nanotechnologies.
<http://www.jnanobiotechnology.com/home>

Actualité et nouvelles en nanotechnologies

AzoNano

<http://www.azonano.com/>

International Small Technology Network

<http://www.nanotechnology.com>

Nano Science and Technology Institute

<http://www.nsti.org/news>

Nanotechnology Now

<http://www.nanotech-now.com/>

Nanotechweb.org

<http://www.nanotechweb.org/>

Nanotechwire.com

<http://www.nanotechwire.com>

NanoTsunami

<http://www.voyle.net/>

Observatoire des Micro et Nanotechnologies

<http://www.omnt.fr/>

Smalltimes

<http://www.smalltimes.com>

Annexe 1

Quelques exemples d'applications des nanotechnologies

Industries automobile et aéronautique : des matériaux renforcés par des nanoparticules pour être plus légers, des pneus renforcés par des nanoparticules pour durer plus longtemps et qui sont recyclables, de la peinture extérieure et des vitres autonettoyantes, des plastiques ininflammables et peu coûteux, des textiles et recouvrements infroissables, qui résistent aux taches et se réparent d'eux-mêmes, des catalyseurs.

Industries de l'électronique et des communications : enregistrement de données avec des médias utilisant les nanocouches et les points quantiques, des écrans plats, la technologie sans fil, des capteurs, de nouveaux appareils et processus dans tout le domaine des technologies de l'information et de la communication, des vitesses de traitement et des capacités d'enregistrement moins coûteuses tout en étant des millions de fois plus rapides que les méthodes actuelles et en consommant moins d'énergie.

Industries chimiques et des matériaux : des catalyseurs qui augmentent l'efficacité énergétique des usines de transformation chimique et qui accroissent l'efficacité de la combustion des véhicules moteurs (ce qui va diminuer la pollution), des outils de coupe extrêmement durs et résistants, des fluides magnétiques intelligents pour les lubrifiants et les joints d'étanchéité, des filtres pour la séparation des molécules.

Industries pharmaceutique, des biotechnologies et des soins de santé : de nouveaux médicaments basés sur des nanostructures, des systèmes de diffusion des médicaments qui ciblent des endroits précis dans le corps humain, des matériaux de remplacement biocompatibles avec les organes et les fluides humains, des tests d'autodiagnostic pouvant être utilisés à domicile, des capteurs pour des laboratoires tenant sur une puce, des matériaux pour la régénération des os et des tissus, des produits cosmétiques.

Secteur manufacturier : une ingénierie de précision pour la production de nouvelles générations de microscopes et d'instruments de mesure, de nouveaux processus et de nouveaux outils pour manipuler la matière au niveau atomique, des nanopoudres incorporées dans des matériaux en vrac avec des propriétés spéciales telles que des senseurs qui détectent les bris imminents et des contrôles en mesure de corriger le problème, autoassemblage de structures à partir de molécules, des matériaux inspirés par la biologie ainsi que des biostructures.

Secteur de l'énergie : de nouveaux types de batteries, photosynthèse artificielle permettant de produire de l'énergie de façon écologique, entreposage sécuritaire de l'hydrogène pour utilisation comme combustible propre, des économies d'énergie résultant de l'utilisation de matériaux plus légers et de plus petits circuits, des revêtements nanostructurés, des piles à combustible, des piles solaires, des catalyseurs.

Exploration de l'espace : des véhicules spatiaux plus légers, une production et une gestion plus efficaces de l'énergie, des systèmes robotiques très petits et efficaces.

Environnement : des membranes sélectives qui peuvent filtrer les contaminants ou encore le sel de l'eau, des pièges nanostructurés pour enlever les polluants des rejets industriels, la caractérisation des effets des nanostructures sur l'environnement, des réductions importantes dans l'utilisation des matériaux et de l'énergie, la réduction des sources de pollution, des possibilités nouvelles pour le recyclage.

Domaine militaire : des détecteurs et des correcteurs d'agents chimiques et biologiques, des circuits électroniques beaucoup plus efficaces, des matériaux et des recouvrements nanostructurés beaucoup plus résistants, des textiles légers qui se réparent d'eux-mêmes, le remplacement du sang, des systèmes de surveillance miniaturisés, de nouveaux types d'armes.

Conseil de la science et de la technologie*

* *Op. cit.* ; cette liste présentée par le Conseil dans son avis sur les nanotechnologies, p. 3, est tirée de : NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL (États-Unis), *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report*, septembre 1999 [en ligne] <http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Research.Directions/cover.pdf>. La Commission la reproduit ici avec quelques modifications mineures.

Annexe 2

Aperçu prospectif d'applications des nanotechnologies*

Secteur des technologies de l'information

Matériaux/techniques	Applications	Échelle de temps (entrée sur le marché)
Pré-2015		
Structures à puits quantiques	Télécommunications/industrie de l'optique. Potentiel pour des applications dans le développement des lasers utilisés dans la communication des données.	Laser à puits quantique déjà utilisé dans les lecteurs CD. Pas optimisé pour le domaine des communications (dans 4-6 ans).
Structures à points quantiques	Utilisation des communications à fibres optiques pour construire des ordinateurs.	Points quantiques toujours au stade de la recherche (dans 7-8 ans).
Technologies des cristaux photoniques	Secteur des communications par fibres optiques. Les circuits photoniques intégrés peuvent être théoriquement mille fois plus denses que les circuits électroniques. Les nouvelles propriétés et le confinement ouvrent la voie à des dispositifs consommant beaucoup moins d'énergie.	Au stade de la R-D. Intérêt commercial très grand.
Nanotubes de carbone en nanoélectronique	Mémoire et stockage: prototypes commerciaux de mémoires vives (RAM), d'écrans et de papier électronique (E-paper).	Écrans plats disponibles. Prototypes commerciaux de mémoires vives. Commercialisation de papier électronique bientôt.
Spintronique: utilisation du spin de l'électron pour l'électronique	Disques durs à ultra-haute capacité et mémoires d'ordinateurs.	Démonstration de têtes de lecture.
Polymères	Technologies de l'affichage (écrans).	Commercialisation en cours.
Post-2015		
Électronique moléculaire (y compris ordinateurs à ADN)	Circuits basés sur une molécule et transistors à un électron.	Démonstration d'un transistor à un électron. Toujours immature mais potentiel énorme.
Traitement quantique de l'information	Utilisation de la physique quantique pour le traitement des données à l'aide d'ordinateurs quantiques.	Au stade de la recherche fondamentale.

* Tableau produit par Marco BLOUIN. Information tirée en partie de: Alexander Huw ARNALL, *Future Technologies, Today's Choices. Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics; A Technical, Political and Institutional Map of Emerging Technologies*, A report for the Greenpeace Environmental Trust, Londres, juillet 2003 [en ligne] <http://www.greenpeace.org.uk/MultimediaFiles/Live/FullReport/5886.pdf>.

Secteur pharmaceutique et secteur médical

Matériaux/techniques	Propriétés	Applications	Échelle de temps (entrée sur le marché)
Diagnostic			
Marqueurs nanométriques	Détection de faibles quantités d'une substance, jusqu'à seulement une molécule.	Détection de cellules cancéreuses.	Long terme.
Laboratoire sur puce (<i>lab-on-a-chip</i>)	Miniaturisation et augmentation de la vitesse du processus d'analyse.	Laboratoires portatifs miniatures pour l'industrie chimique, en contrôle et en prévention des maladies, en environnement.	Sur le marché, mais le coût est élevé.
Points quantiques	Les points quantiques rendus sensibles à des molécules peuvent les détecter précisément selon leurs spectres lumineux uniques.	Diagnostic.	Au stade de développement embryonnaire. Intérêt commercial.
Libération de médicaments			
Nanoparticules (50-100 nm)	Peuvent pénétrer les pores des cellules cancéreuses.	Traitement du cancer.	Long terme.
Contrôle nanométrique de la taille (100-200 nm)	Faible solubilité.	Traitement plus efficace avec les médicaments actuels.	Long terme.
Polymères	Ces molécules peuvent être modulées avec un très haut degré de fidélité.	Transport nanobiologique de médicaments.	Long terme.
Ligands sur des nanoparticules	Ces molécules peuvent être modulées avec un très haut degré de fidélité.	Les ligands peuvent reconnaître les tissus endommagés et libérer le médicament à cet endroit précis.	Long terme.
Nanocapsules	Peuvent franchir le système immunitaire pour transporter directement l'agent thérapeutique vers le site concerné.	Traitement du sida, du cancer.	Essais cliniques préliminaires sur des fullerènes de Buckminster (« buckyballs ») pour le traitement du sida.
Adhérence accrue sur les particules	Augmentation de la rétention locale des médicaments.	Libération lente de médicaments.	Long terme.
Matériaux nanoporeux	Peuvent franchir le système immunitaire pour transporter directement l'agent thérapeutique vers le site concerné.	Implants pour la libération contrôlée de médicaments.	Stade préclinique pour le traitement du diabète.
Pharmacie sur puce	Mesure la condition du patient, régule et maintient le taux hormonal.	Traitement du diabète.	À un stade moins avancé que le laboratoire sur puce.
Membranes nanoporeuses	Triage de biomolécules.	Analyses des gènes et séquençage.	Commercialisation en cours.

Régénération, croissance et réparation de tissus			
Prothèses	Miniaturisation, baisse de poids, résistance accrue, biocompatibilité accrue.	Rétine, implants cochléaires, colonne vertébrale.	Les premiers produits commerciaux seront probablement les greffons pour les tissus externes. Ensuite, dents, implants osseux, tissus internes.
Manipulation cellulaire	Manipulations et confinements de cellules.	Remplacement de tissus nerveux, croissance d'organes de remplacement.	6-7 ans.

Domaine de l'énergie

Matériaux/techniques	Applications	Échelle de temps (entrée sur le marché)
Production d'énergie		
Matériaux polymériques	Cellules solaires.	5 ans.
Combinaison de molécules organiques et inorganiques	Cellules solaires. Traitement photocatalytique de l'eau. Le processus de fabrication pourrait être très peu coûteux.	Commercialisation en cours, mais limitée. Les applications de faible consommation d'énergie entreront sur le marché en premier.
Puits quantiques	Cellules solaires à puits quantiques. L'absorption d'une plus large partie du spectre solaire permettrait d'augmenter l'efficacité des cellules solaires.	Recherche fondamentale.
Nanocolonnes	Ces structures peuvent être modulées pour être sensibles à différentes parties du spectre solaire. Cellules solaires à faible coût.	Long terme.
Conversion de carburant/stockage		
Catalyseurs nanostructurés	Conversion de carburant.	Actuel – 5 ans.
Nanotubes	Stockage de carburant : hydrogène, méthane pour les piles à combustible.	2-5 ans.
Nanoparticules	Amélioration des capacités des batteries.	Long terme.
Hydrures métalliques nanostructurés	Stockage d'hydrogène pour les piles à combustible.	1-5 ans

Annexe 3

Questionnement relatif aux divers enjeux des nanotechnologies en matière de recherche, de développement et de commercialisation au Canada*

I. Perception et participation du public

- Quelle est la perception du public à propos des nanotechnologies, au Canada et ailleurs ? Sur quoi se fonde cette perception ?
- Quelles formes revêtent les représentations populaires des nanotechnologies et quels sont leurs impacts ?
- Quel devrait être le rôle des scientifiques dans le débat public entourant les nanotechnologies ?
- Quelles stratégies de communication et de participation doivent être élaborées afin de favoriser un débat réel sur les risques et les bénéfices des nanotechnologies ?

II. Enjeux de réglementation

- Quels sont les effets des nanoparticules et des nanomatériaux sur l'environnement et sur l'être humain ?
- Quel devrait être le rôle du principe de précaution dans la réglementation des nanomatériaux et des nanotechnologies ?
- Étant donné leurs propriétés uniques et distinctes, est-ce que les nanotechnologies peuvent être balisées de façon appropriée par le cadre réglementaire existant ?
- Si des modifications législatives ou réglementaires sont nécessaires dans le contexte des nanotechnologies, un niveau de coopération sans précédent devra alors exister entre les divers paliers gouvernementaux, mais également entre les divers organismes de chaque palier. Comment s'assurer que le cadre réglementaire mis en place pour les nanotechnologies sera logique, efficace, transparent, et qu'il sera en mesure de s'adapter aux changements technologiques ?

III. Enjeux économiques et de commercialisation

A. Enjeux généraux de commercialisation

- Quel sera l'impact économique des nanotechnologies ? Quelles seront les conséquences économiques de la commercialisation des nanotechnologies sur les divers secteurs économiques ?
- Quelles méthodes peuvent être utilisées afin d'évaluer les impacts sur l'économie d'une technologie de rupture ?
- Est-ce que les modes de commercialisation des nanotechnologies seront différents de ceux utilisés pour d'autres technologies ? Si oui, en quoi consisteront ces différences ? Des situations particulières pourraient-elles entraîner des conflits d'intérêts ?

B. Enjeux de propriété intellectuelle

- Quels seront les enjeux relatifs à la propriété intellectuelle ? Est-ce que ces enjeux seront différents de ceux qui sont liés à d'autres technologies émergentes ?
- Est-ce que le développement de la propriété intellectuelle et son exploitation, en tant que partie intégrante du processus de commercialisation, poseront des défis particuliers pour la commercialisation des nanotechnologies ?

* Lorraine SHEREMETA et Abdallah S. DAAR, « The Case for Publicly Funded Research on the Ethical, Environmental, Economic, Legal and Social Issues Raised by Nanoscience and Nanotechnology (NE³LS) », *Health Law Review*, vol. 12, n° 3, 2004.

IV. Gouvernance, mondialisation et équité

- Quel sera l'impact des nanotechnologies sur les pays en développement ainsi que sur les communautés marginalisées du Canada ?
- Comment s'assurer que les bénéfices des nanotechnologies seront partagés de façon équitable avec les populations des pays en voie de développement et les communautés moins nanties du Canada ? Comment éviter que se creuse un fossé nanotechnologique ?
- Y a-t-il une place pour le partage des bénéfices dans un contexte de commercialisation des nanotechnologies ?

V. Enjeux philosophiques et éthiques

- Quels sont les enjeux philosophiques plus larges qui doivent être évalués dans le cadre du développement des nanotechnologies ?
- Quels seront les impacts des nanotechnologies sur les perceptions et les définitions de ce qui est normal, tant sur le plan de la santé que de la maladie ?
- Comment et dans quels domaines les nanosciences et les nanotechnologies risquent-elles de perturber les conceptions traditionnelles de la vie privée et de la confidentialité ?

VI. Enjeux liés aux applications spécifiques

- Quels sont les usages militaires anticipés des nanotechnologies ? De quelle manière ces usages devraient-ils être encadrés ?
- Quelles sont, en santé, les applications potentielles des nanotechnologies ? Quels défis risquent-elles de poser sur les plans éthiques, légaux et sociaux ?
- Quelles sont les applications possibles des nanotechnologies relativement aux handicaps et à l'amélioration des capacités ? Quels effets ces applications auront-elles sur la société ?

Les activités de consultation et d'information de la Commission

Experts entendus dans le cadre de présentations au comité de travail

D^r François A. Auger, directeur du Laboratoire d'organogenèse expérimentale (LOEX)

Sylvain Cofsky, directeur du développement industriel et régional, NanoQuébec

Peter Grütter, professeur-chercheur, Département de physique, Université McGill; directeur scientifique de NanoPic (CRSNG)

Mark Hunyadi, professeur-chercheur, Faculté de philosophie, Université Laval

Andrée-Lise Méthot, présidente-directrice générale, Fonds d'investissement en développement durable

Claude Ostiguy, directeur des opérations, Service de soutien à la recherche et à l'expertise, Direction de la recherche et de l'expertise, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

Adrien Pilon, directeur du Secteur de l'environnement, Institut de recherche en biotechnologies, Conseil national de recherches Canada

André Van Neste, vice-président technologie et cofondateur de Nanox (Québec)

Patrick Vermette, professeur-chercheur, Département de génie chimique, Laboratoire de bio-ingénierie et de biophysique, Université de Sherbrooke

Normand Voyer, professeur-chercheur, CREFSIP – Centre de recherche sur la fonction, la structure et l'ingénierie des protéines, Université Laval

En avril 2006, les personnes suivantes ont accepté de procéder à une lecture critique d'une première version du rapport du comité de travail

Kevin Fitzgibbons, directeur général, Bureau du conseiller national des sciences, Gouvernement du Canada

Céline Lafontaine, professeure adjointe, Faculté des arts et des sciences, département de sociologie, Université de Montréal

Claude Ostiguy, directeur des opérations, Service de soutien à la recherche et à l'expertise, Direction de la recherche et de l'expertise, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

La Commission remercie toutes ces personnes pour la collaboration qu'elles ont apportée à sa réflexion et à l'enrichissement du contenu de son avis.

Participation à des événements

- Forum NanoQuébec, 26 mai 2005, Montréal : *Les nanotechnologies en réponse aux défis de l'industrie*
Communication de la présidente de la CEST dans le cadre du panel sur le développement responsable de l'industrie : « Éthique, nanoscience, nanotechnologies »
- Nanoforum 2005, 15 juin 2005, Université McGill (Montréal)
- Congrès annuel de l'ACFAS, colloque de NanoQuébec, 16 mai 2006, Université McGill (Montréal) : *Les nanotechnologies : formation et éthique*
Communication du président du comité de travail : « Bilan des travaux de la CEST sur les enjeux éthiques des nanotechnologies »
- Quatrième atelier annuel sur la nanomédecine, 19-20 juin 2006, Université d'Alberta (Edmonton)
- Nanoforum Canada : 3^e forum canadien sur la nanoscience et la nanotechnologie, 20-22 juin 2006, Université d'Alberta (Edmonton)
Communication de la secrétaire du comité de travail : « Responsible development of nanotechnology : a perspective from Québec's Commission de l'éthique de la science et de la technologie »

Les membres de la Commission de l'éthique de la science et de la technologie*

Présidente

M^e Édith Deleury

Professeure – Faculté de droit
Université Laval

Membres

Patrick Beaudin

Directeur général
Société pour la promotion de la science
et de la technologie

Louise Bernier

Doctorante en droit (bioéthique, génétique et droit)
Université McGill

Sabin Boily

Consultant Valorisation-Innovation

D^r Pierre Deshaies

Médecin spécialiste en santé communautaire
Chef du département clinique de santé publique
Hôtel-Dieu de Lévis

Hubert Doucet

Professeur de bioéthique
Faculté de médecine et Faculté de théologie
Université de Montréal

Benoît Gagnon

Chercheur
Chaire Raoul-Dandurand en études stratégiques
et diplomatiques (UQAM)
Doctorant à l'Université de Montréal

Jacques T. Godbout

Sociologue
Institut national de la recherche scientifique –
Urbanisation, Culture et Société

Michèle S. Jean

Centre de recherche en droit public
Université de Montréal
Présidente de la Commission canadienne
pour l'UNESCO

Johane Patenaude

Professeure (éthique)
Faculté de médecine
Université de Sherbrooke

François Pothier

Professeur
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation
Université Laval

Eliana Sotomayor

Travailleuse sociale
Doctorante à l'Université de Montréal

(un siège vacant)

Membres invités

Geneviève Bouchard

Sous-ministre adjointe
Direction générale des politiques
Ministère de l'Emploi et de la Solidarité sociale
(Québec)

M^e Danielle Parent

Avocate
Bureau du Commissaire au lobbyisme du Québec

Coordonnatrice

Diane Duquet

* Au moment de l'adoption de l'avis.

