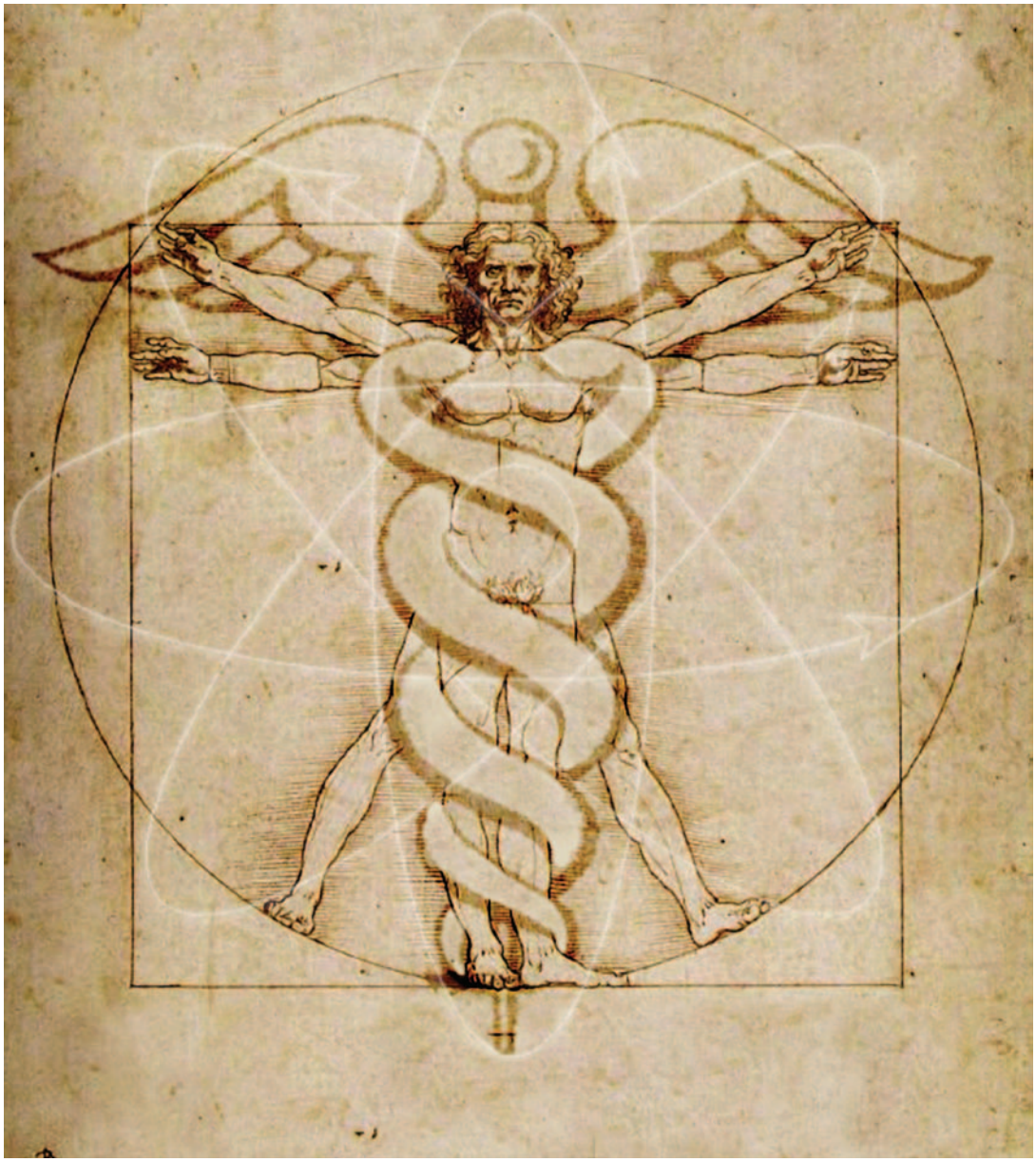


Rx NANO

Les applications médicales des nanotechnologies

Quel en sera l'impact sur les collectivités marginalisées ?

Rx nano – Vue d'ensemble

L'enjeu : L'application des nanotechnologies au domaine médical peut révolutionner les soins de santé en offrant des outils puissants pour le diagnostic et le traitement des maladies à l'échelle moléculaire. Mais l'engouement pour les nanomédicaments risque de détourner les fonds déjà limités de la RxD (RD médicale) consacrés à des besoins essentiels en santé et d'accaparer des ressources qui pourraient aller aux aspects non médicaux de la santé et du bien-être de la collectivité. Même si on la présente comme une panacée aux besoins pressants du Sud mondialisé, la nanomédecine est contrôlée par le Nord et conçue avant tout pour les marchés riches. Les nanotechnologies donnent à l'industrie pharmaceutique les moyens de transformer chaque personne en patient et chaque patient en client rentable, par la médicalisation des maux sociaux à coup de médicaments et de dispositifs visant l'*amélioration* des facultés humaines (AFH). Les AFH issues des nanotechnologies marquent peut-être l'avènement d'une humanité à deux vitesses : l'*Homo sapiens* et l'*Homo sapiens 2.0*.

Le marché : Au milieu de 2006, 130 médicaments et systèmes d'administration et 125 dispositifs ou tests diagnostiques nanos sont au stade préclinique, clinique ou commercial. Le marché combiné de la nanomédecine (administration de médicaments, thérapeutique et diagnostic) passera d'un peu plus de 1 milliard $ en 2005 à presque 10 milliards $ en 2010 – la National Science Foundation des É.-U. prédit que la nanotechnologie produira la moitié de la gamme des produits pharmaceutiques d'ici 2015. La nanomédecine aidera les géants pharmaceutiques à prolonger leurs brevets de monopole sur les composés existants et les médicaments plus anciens et moins performants. Certains analystes laissent entendre que la nanomédecine aura pour effet d'accroître la rentabilité et de dissuader la concurrence.

L'impact : C'est peut-être dans le domaine de l'amélioration des facultés humaines (AFH) que la nanomédecine aura le plus d'impact. Combinée à d'autres technologies nouvelles, la nanomédecine permettra en principe de modifier la structure, la fonction et les capacités du corps et du cerveau humains. Dans un avenir proche, les AFH nanos vont gommer la frontière entre *thérapie* et *amélioration*. Cela peut littéralement métamorphoser la notion de santé ou d'humanité.

L'heure juste : Paradoxalement, on connaît très peu l'impact sur la santé et l'environnement des nanomatériaux utilisés pour mettre au point les nanomédicaments. Le domaine naissant de la *nanotoxicologie* baigne dans l'incertitude. Même si on commercialise déjà des nanoproduits (y compris des nanomédicaments), aucun État ne dispose d'une réglementation pour régir des questions de sécurité fondamentales à l'échelle nanométrique.

La politique : Les donateurs de l'OCDE ont failli à leur promesse d'offrir des moustiquaires aux pays touchés par la malaria; ils ont fourni en moyenne un condom par adulte de sexe masculin pour combattre le VIH/sida dans le Sud mondialisé. Et ils veulent nous faire croire que des investissements massifs dans les nanomédicaments vont profiter aux pays pauvres? Les États doivent mener de toute urgence une évaluation participative des risques liés à la nanomédecine sur les plans sociétal, scientifique, éthique, culturel, socioéconomique et environnemental. Les politiques doivent tenir compte des préoccupations exprimées par la société civile et les mouvements sociaux, y compris le mouvement de défense des droits des personnes handicapées et le mouvement des femmes. Pour suivre l'évolution technologique, il faut un cadre intergouvernemental chargé de contrôler et d'évaluer l'introduction des nouvelles technologies. À sa prochaine rencontre en 2007, l'Assemblée mondiale de la santé doit entreprendre une analyse approfondie de la nanomédecine en l'inscrivant dans le contexte plus large de la santé sociale.

Rx NANO

Les applications médicales des nanotechnologies

Quel en sera l'impact sur les collectivités marginalisées ?

etc group

action group on erosion, technology and concentration

Septembre 2006

ETC Group remercie le Centre de recherches pour le développement international, Canada, de l'appui financier accordé à sa recherche sur les applications médicales des technologies à l'échelle nanométrique. Nous voulons aussi exprimer notre reconnaissance pour l'appui accordé par SwedBio (Suède), l'Agence canadienne de développement international (ACDI), la Fondation Marin Community (É.-U.), le CS Fund (É.-U.) et la Fondation HKH (É.-U.). Les points de vue exprimés dans ce document sont cependant ceux d'ETC Group.

Illustrations originales de Raymond Pagé.

ETC Group se voue à la conservation et à l'essor durable de la diversité culturelle et écologique ainsi qu'aux droits de la personne. Pour ce faire, ETC Group appuie les avancées socialement responsables des technologies utiles aux populations pauvres et marginalisées, et s'intéresse aux enjeux de la gouvernance qui affectent la communauté internationale. ETC Group surveille également la propriété et le contrôle des technologies et la consolidation du pouvoir des grandes sociétés.

ETC Group a produit une série de rapports sur l'impact économique et social des technologies convergentes à l'échelle nanométrique :

Extreme Genetic Engineering: An Introduction to Synthetic Biology
(à paraître en 2006)

Rx nano – Les applications médicales des nanotechnologies – Quel en sera l'impact sur les collectivités marginalisées ?
Septembre 2006

NanoGeoPolitics: ETC Group Surveys the Political Landscape,
juillet-août 2005

Nanobrevets « de deuxième nature » — Implications pour les pays du Sud,
juin 2005

La ferme atomisée – L'impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation,
novembre 2004

Comme toutes les autres publications d'ETC Group, on peut les télécharger sans frais à partir du site Web :

www.etcgroup.org

etc group

action group on erosion, technology and concentration

Table des matières

Sommaire **1**
Introduction **5**
Le marché et les acteurs 5
Pourquoi les nanos ? **8**
Exploiter les effets quantiques 8
Accroître la biodisponibilité 9
Atomiser la pharmacopée 9
Nouveauté et mobilité des nanos : les effets pervers **12**
Particules sans frontières ? 13
De la thérapie à l'amélioration : l'*Homo sapiens posthumain* **14**
Les nanotechnologies serviront-elles à combattre la santé ? 14
Jogger sur le tapis roulant de l'amélioration… y a-t-il un bouton d'arrêt ? 15
Le bang : la nano permet la convergence des technologies. cela va-t-il mener à de *meilleurs êtres humains* ? .. **22**
comment la nanomédecine abordera-t-elle la maladie et la pauvreté dans le sud mondialisé ? **24**
Médicaments essentiels 28
Une nano *favorable aux pauvres* ? 31
Un antipaludique grâce à la nano-ingénierie 31
VivaGel – atomiser les microbicides 32
Applications de la nanomédecine (administration des médicaments, thérapeutique, imagerie, diagnostic) **36**
1. Administration ciblée des médicaments 36
2. Nanoparticules thérapeutiques 37
3. Nanoparticules pour l'imagerie et le diagnostic biomédical 38
4.Ingénierie tissulaire et implants 40
Conclusion **42**
Recommandations **44**
Annexe : glossaire de la Nanomédecine **47**
Notes de fin **49**

ENCADRÉS ET TABLEAUX

ENCADRÉ 1 : La *santé*, ça compte ! 3
Tableau 1 : Médicaments et produits médicaux nanos approuvés par la FDA 7
ENCADRÉ 2 : Multiplier les médicaments : la meilleure arme contre les maladies? 10
Tableau 2 : Des technologies qui appliquent/pourraient appliquer les AFH 18
ENCADRÉ 3 : Objectifs du millénaire pour le développement en rapport avec la santé 25
Tableau 3 : Proportion de la population de pays africains ayant un accès régulier aux médicaments essentiels 30
ENCADRÉ 4 : Aborder la santé sous l'angle du grand défi : est-ce que ça fonctionne ? 33
Tableau 4 : Projets actuels en santé mondiale 35

Sommaire

Ce rapport étudie les applications médicales des médicaments, dispositifs et outils diagnostiques issus des nanotechnologies. Quel sera l'impact de la nanomédecine sur l'industrie pharmaceutique? Comment la nanomédecine abordera-t-elle les besoins de santé des collectivités marginalisées, notamment dans le Sud mondialisé?

Les applications médicales des technologies à l'échelle nanométrique (nanotechnologies, ou nanos) peuvent offrir des outils nouveaux et puissants pour détecter, diagnostiquer et traiter les maladies à l'échelle moléculaire. Les adeptes des nanos affirment que la nanomédecine va révolutionner les soins de santé.

Voici quelques percées réalisées dans le domaine.

- Nanocapteurs qui circulent dans l'organisme pour contrôler le taux de glucose ou de cholestérol et les niveaux d'hormones
- Nanobilles d'or qui ciblent les cellules cancéreuses pour détruire les tumeurs au laser de manière non invasive
- Nanoparticules intelligentes qui se rendent à un endroit déterminé du corps pour administrer une dose précise de médicament
- Points quantiques luminescents qui marquent une protéine donnée dans une cellule vivante
- Nanoparticules d'argent qui détruisent les microbes résistant aux antibiotiques
- Charpentes tridimensionnelles nanostructurées pour cultiver de nouveaux organes et tissus humains

On croit nager en pleine science-fiction avec les applications médicales des nanos, et pourtant, il existe déjà ici une poignée de médicaments et dispositifs nanos – et il y en a beaucoup plus en gestation dans les laboratoires des technologues de l'infiniment petit. Au milieu de 2006, 130 médicaments et systèmes d'administration et 125 dispositifs ou tests diagnostiques nanos en sont au stade préclinique, clinique ou commercial. Le marché combiné de la nanomédecine (administration des médicaments, thérapeutique et diagnostic) passera d'un peu plus de 1 milliard $ en 2005 à presque 10 milliards $ en 2010. Jusqu'ici, c'est l'État – et non l'industrie – qui a pris la direction de la RD médicale (RxD) nano. Des chercheurs et des jeunes entreprises nanos subventionnés par des fonds publics sont encore les principaux acteurs; les géants pharmaceutiques jouent un rôle marginal – mais des analystes prédisent qu'ils ne tarderont pas à sauter dans l'arène.

La nanomédecine comporte sans doute des avantages, mais elle se développe sans débat public quant à son impact profond sur le plan économique et social. Des nanoproduits à usage interne chez l'être humain peuvent exercer un effet thérapeutique, mais on ne sait pas grand-chose de l'impact exercé par la nanotechnologie sur la santé et l'environnement. Des nanoproduits contenant des nanomatériaux artificiels libérés dans l'environnement ou la chaîne alimentaire peuvent s'introduire dans le corps par accident. Les percées en nanomédecine pourraient améliorer la santé des gens alors que les nouveaux nanomatériaux libérés dans l'environnement risquent de les rendre malades. Personne ne peut distinguer les nanoproduits bénins des produits nocifs – le domaine naissant de la *nanotoxicologie* baigne dans l'incertitude.

« Grâce à la création de nouvelles molécules et à la manipulation des molécules naturelles, la boîte à surprises des nanotechnologies présente des possibilités renversantes dans le domaine des soins de santé… les nanotechnologies peuvent nous offrir des systèmes plus efficaces pour détecter à l'avance les cancers et les maladies cardiaques, des traitements pour les maladies évolutives comme la fibrose kystique, des techniques pour améliorer l'implantation de hanches artificielles et même des reins artificiels »

– Barnaby J. Feder, « Doctors Use Nanotechnology to Improve Health Care », *New York Times*, 1er novembre 2004.

La nanomédecine comporte sans doute des avantages, mais elle se développe sans débat public quant à son impact profond sur le plan économique et social.

Dans un proche avenir, les nanotechnologies à usage interne vont gommer la frontière entre thérapie et amélioration, ce qui peut littéralement métamorphoser la notion de santé ou d'humanité.

Les analystes de l'industrie prédisent déjà que la nanomédecine accroîtra la rentabilité, élargira le domaine de la propriété intellectuelle des sociétés et dissuadera la concurrence.[2]

Les technologies qui confluent à l'échelle nanométrique (dont la biotechnologie, la neurotechnologie et les technologies de l'information) produiront bien plus que de minuscules dispositifs d'administration des médicaments et des méthodes diagnostiques à l'échelle cellulaire pour les malades. La convergence technologique permettra en principe d'altérer la structure, la fonction et les facultés du corps et du cerveau humains. Dans un proche avenir, les nanotechnologies à usage interne vont gommer la frontière entre *thérapie* et *amélioration*, ce qui peut littéralement métamorphoser la notion de santé ou d'humanité. Grâce à la nano, d'aucuns prétendent que l'on pourra vivre bien au-delà de cent ans (en *éliminant les décès prématurés*) et télécharger de l'information directement dans le cerveau. Au bout du compte, l'acceptation générale des technologies d'amélioration des facultés humaines (AFH) – si elles fonctionnent comme prévu – créera un nouveau *fossé des capacités* entre les personnes qui peuvent se les payer et celles qui n'en ont pas les moyens (ou qui refusent de le faire).

On présente les nanotechnologies comme l'instrument qui permettra d'atteindre les objectifs du Millénaire pour le développement, soit les cibles établies par les Nations unies pour favoriser le développement humain ainsi que la viabilité sociale et économique dans le Sud mondialisé.[1] L'innovation en nanomédecine est cependant contrôlée par le Nord et elle est d'abord conçue pour les marchés de l'OCDE. Les médicaments et dispositifs nanos contribueront à consolider et à prolonger les brevets de monopole sur les composés existants et les médicaments plus anciens et moins performants. Les analystes de l'industrie prédisent déjà que la nanomédecine accroîtra la rentabilité, élargira le domaine de la propriété intellectuelle des sociétés et dissuadera la concurrence.[2] Dans ce scénario du statu quo, les innovations en nanomédecine vont sans doute accentuer le pouvoir de l'industrie pharmaceutique sans changer grand-chose aux problèmes de santé et de pauvreté des collectivités marginalisées.

Il faut inscrire dans un contexte social et politique plus large le développement de la nanomédecine et son potentiel en regard des besoins mondiaux en santé. La crise mondiale de la santé ne vient pas du manque d'innovation dans les sciences ou les technologies médicales. Malgré des décennies de percées spectaculaires dans les technologies qui permettent de sauver des vies et d'en prolonger la durée, un tiers de la population du globe n'a pas d'accès régulier aux médicaments essentiels.[3] Dans certaines régions d'Asie et d'Afrique, c'est plus de la moitié de la population. Selon des rapports émis par l'Organisation mondiale de la santé en 1988 et en 2004, le nombre de personnes privées de médicaments essentiels n'a pratiquement pas changé pendant ces 16 années. Les nouvelles technologies médicales n'ont aucune pertinence pour les pauvres si elles ne sont ni accessibles, ni abordables. L'innovation scientifique ne rime à rien si les personnes marginalisées n'ont pas accès aux technologies et aux traitements existants.

Dans le contexte social et politique actuel, un investissement majeur dans la RxD nano n'est peut-être pas le remède qu'il faut pour combler les besoins de santé, notamment dans le Sud mondialisé. L'histoire démontre que les nouvelles technologies n'offrent pas de solution aux problèmes complexes enracinés dans la pauvreté et les inégalités sociales. Depuis le début du XXIe siècle, l'espérance de vie a *diminué* dans 38 pays. Même en Amérique du Nord et en Europe, où

le taux de mortalité baisse de façon constante depuis le début du XXe siècle, des études démontrent que ce phénomène est très peu lié aux interventions médicales et qu'il faut plutôt l'attribuer à l'amélioration de la nutrition et de l'hygiène.

Les nanomédicaments et l'engouement pour les technologies d'amélioration des facultés risquent d'accaparer les fonds déjà limités de la RxD consacrés à des besoins essentiels en santé. Mais cela comporte des coûts de renonciation encore plus élevés. L'importance accordée aux solutions médicales détourne l'attention et les ressources des aspects non médicaux de la santé et du bien-être de la collectivité. Des interventions de base qui améliorent l'hygiène et le logement, l'accès à l'eau potable et à l'éducation – entre autres – pourraient au bout du compte faire progresser davantage la santé des gens que des technologies médicales de pointe.

Les nouvelles technologies médicales n'ont aucune pertinence pour les pauvres si elles ne sont ni accessibles, ni abordables. L'innovation scientifique ne rime à rien si les personnes marginalisées n'ont pas accès aux technologies et aux traitements existants.

Encadré 1 : La *santé*, ça compte![1]

Comment définit-on la *santé*? Est-ce la même chose que le *bien-être*? Sinon, qu'est-ce qui les distingue? Il y a au moins deux écoles de pensée en la matière : pour certains, la santé est le fonctionnement normatif de l'ensemble du corps et, par conséquent, l'absence de trouble ou de maladie susceptibles d'altérer le fonctionnement normatif – c'est le modèle *médical*. Les tenants de cette approche admettent que la santé est affectée par les conditions *sociales* (stress lié au travail ou vie en zone en guerre), mais le centre d'intérêt – et l'objet de l'intervention – reste le corps humain (ainsi, on traitera l'hypertension causée par le stress au travail ou la dépression clinique des victimes de guerre). Selon le modèle médical, le corps qui ne fonctionne pas de façon normative appartient forcément à un *patient* qui doit recevoir un traitement médical visant à rétablir (ou tenter de rétablir) le fonctionnement normatif.

On peut aussi envisager la santé de façon plus large, d'après le modèle *social*, selon lequel la santé englobe le bien-être social et mental – en plus du bien-être physique et de l'absence de troubles physiques. Selon le modèle social, la personne n'a pas besoin d'être un patient dont le corps ne fonctionne pas de façon normative pour avoir des problèmes de santé. Une femme victime de discrimination sexuelle au travail a peut-être un corps exempt de maladies physiques, mais cela ne veut pas dire qu'elle est en santé selon les critères du modèle social. Depuis sa création en 1948, l'Organisation mondiale de la santé inclut le bien-être social et mental parmi les facteurs nécessaires à la santé.[2]

Il y a des implications énormes à choisir un modèle plutôt que l'autre, surtout sur le plan des points d'intervention. Dans le cas du modèle social, on pourra aider la victime d'une injustice sociale (discrimination sexuelle, par exemple) à recouvrer la santé par des interventions telles qu'un procès civil, la législation et les protestations – ou toute autre action qui rétablira le bien-être social et

Des interventions de base qui améliorent l'hygiène et le logement, l'accès à l'eau potable et à l'éducation – entre autres – pourraient au bout du compte faire progresser davantage la santé des gens que des technologies médicales de pointe.

Grâce aux nouvelles nanotechnologies, on a multiplié les interventions qui peuvent rendre nos corps plus puissants, plus intelligents et plus durables.

Qui d'entre nous a envie de devenir un Homo sapiens 2.0 ?

mental, idéalement par la modification des structures sociales ayant permis
lmental, idéalement par la modification des structures sociales ayant permis
l'injustice. On peut évidemment traiter la *maladie* sociale dans le cadre du modèle médical – soit en traitant ses effets sur le corps (hypertension, dépression, anxiété, par exemple), ou en essayant de *guérir* le patient de la condition à l'origine de la *maladie* sociale. Dans le modèle médical, on proposerait par exemple à un paraplégique victime de discrimination et d'injustice une forme quelconque d'intervention médicale – des jambes bioniques – plutôt que d'aménager les édifices de manière à ce qu'ils soient accessibles à tous.

Grâce aux nouvelles nanotechnologies, on a multiplié les interventions qui peuvent rendre nos corps plus puissants, plus intelligents et plus durables. Fermement convaincus que la technologie peut améliorer même les corps les plus sains (voir p. 15), les transhumanistes ont élaboré une nouvelle conception de la santé. À leurs yeux, tous les corps humains ont un fonctionnement *sous-normatif* – à moins d'avoir bénéficié d'*améliorations* technologiques. Les transhumanistes croient à l'importance du bien-être social, mais ils pensent y arriver en intervenant sur le fonctionnement du corps. Un problème évident de l'approche transhumaniste est que l'état de santé optimal change sans cesse au gré des nouveautés offertes par l'*industrie de l'amélioration*. On connaît déjà la tyrannie impitoyable des logiciels informatiques – sans la dernière mise à niveau, impossible d'accéder au cyberespace. Qui d'entre nous a envie de devenir un *Homo sapiens 2.0*?

Introduction

La nanotechnologie traite de la manipulation de la matière à l'échelle des atomes et des molécules, où la taille se mesure en milliardièmes de mètres. Il y a un milliard de nanomètres (nm) dans un mètre. À l'échelle nanométrique (1 à 100 nm), les matériaux peuvent révéler des propriétés très différentes de celles d'un matériau de composition identique à plus grande échelle. Des propriétés telles que la conductivité, la couleur et la toxicité peuvent changer à l'échelle nano – elles peuvent aussi changer à l'intérieur de l'échelle nano. Les chercheurs exploitent ces changements de propriétés à l'échelle nano pour créer de nouveaux matériaux multifonctionnels.

On dit que la nano est la « technologie transformationnelle du XXIe siècle ».[4] Des experts prédisent qu'elle va révolutionner la fabrication dans l'ensemble des secteurs industriels et, tôt ou tard, « influer sur la production de pratiquement tous les objets manufacturés ».[5]

La médecine fait partie des nombreux secteurs qui seront profondément touchés par les matériaux et dispositifs nanos. Ce rapport étudie les applications médicales des médicaments, dispositifs et outils diagnostiques issus des nanotechnologies, et évalue la façon dont la nanomédecine abordera les besoins de santé des collectivités marginalisées, notamment dans le Sud mondialisé.

Le marché et les acteurs

À l'échelle mondiale, on a consacré environ 9,6 milliards $ à la RD nano dans l'ensemble des secteurs en 2005.[8] Même si c'est le champ de recherche nano le plus prometteur au dire de l'entreprise privée, des politiques et des médias, la nanomédecine a reçu moins de fonds que d'autres secteurs tels que la nanoélectronique et les nanomatériaux.

Selon Lux Research Inc., environ 17 % du financement global consacré aux nanotechnologies en 2005 – à peu près 1,6 milliard $ – est allé au secteur des *sciences du vivant*. (Malgré une définition assez large des *sciences du vivant*, Lux Research rapporte que la plus grande partie de l'investissement dans cette catégorie est allée aux applications médicales des nanotechnologies.)[9]

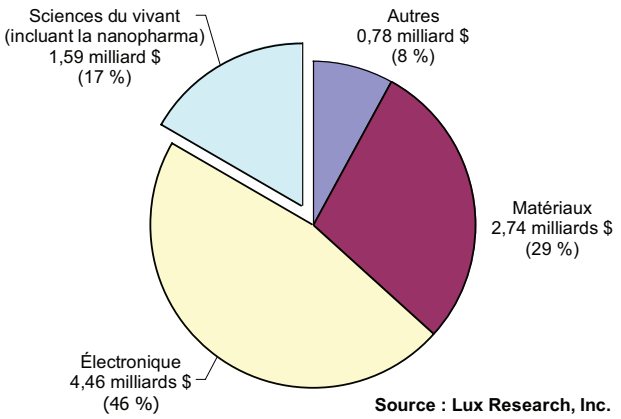
Aux débuts des nanotechnologies (2001), la National Science Foundation (NSF) des É.-U. a prédit qu'elles « aideront à prolonger la vie, améliorer la qualité de vie et étendre les facultés physiques de l'être humain », ajoutant que d'ici 2010 ou 2015, la moitié de la production pharmaceutique – plus de 180 milliards $ par année – s'appuiera sur les nanotechnologies. Plus récemment, Lux Research a prévu que le marché des nanosystèmes d'administration des médicaments passera de 980 millions $ en 2005 à environ 8,6 milliards $ d'ici 2010. Le marché de la nanothérapeutique (comme les pansements à base de nanoargent) passera de 28 millions $ en 2005 à 310 millions $ d'ici 2010. Le marché du nanodiagnostic passera de 56 millions $ en 2005 à un peu plus de 1 milliard $ d'ici 2010.

La nanomédecine : qu'est-ce que c'est?

Selon la Fondation européenne de la science, il s'agit de : « la science et la technologie du diagnostic, du traitement et de la prévention des maladies et des blessures traumatiques, du soulagement de la douleur, de la protection et de l'amélioration de la santé humaine, par le truchement d'outils moléculaires et de connaissances moléculaires du corps humain ».[6]

Les Instituts de recherche en santé du Canada définissent « de façon générale la nanomédecine comme l'outil de mesure ou l'intervention biomédical(e) spécialisé(e)
- à l'échelle moléculaire
- requis(e) pour traiter les maladies ou rétablir le fonctionnement ».[7]

Financement mondial des nanotechnologies par secteur 2005
TOTAL 9,6 milliards $US



Source : Lux Research, Inc.

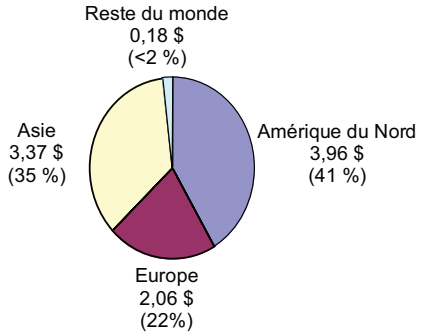
Au milieu de 2006, 130 médicaments et systèmes d'administration et 125 dispositifs ou tests diagnostiques nanos en sont au stade préclinique, clinique ou commercial.

Les géants pharmaceutiques collaborent avec les jeunes entreprises en nanobio, mais comme les nanotechnologies n'ont pas fait leurs preuves et que le processus d'approbation de la FDA reste incertain, les grandes sociétés n'ont pas encore investi en masse.[14]

Même si la nanotechnologie est une industrie naissante, il y a déjà des médicaments et dispositifs médicaux nanos sur le marché et les nanotechnologues sont en train d'en préparer beaucoup plus. Selon *Nanobiotech News*, la filière de la nanomédecine et des dispositifs nanos a connu une croissance fulgurante (68 %) de 2005 à 2006. Au milieu de 2006, 130 médicaments et systèmes d'administration et 125 dispositifs ou tests diagnostiques nanos en sont au stade préclinique, clinique ou commercial; 75 % de ces produits sont mis au point aux É.-U. Parmi les chefs de file en nanomédecine, on aussi trouve le Canada, l'Australie et Israël.[10] (Voir le Tableau 1.) Des analystes de l'industrie qualifient l'approbation d'Abraxane – un nanomédicament pour traiter le cancer du sein – en janvier 2005 par la Food & Drug Administration (FDA) des É.-U. de « tournant décisif » dans l'histoire de la nanomédecine commerciale.[11]

Selon Lynn Yoffee de *Nanobiotech News*, « le tiers (30 %) des produits sont mis au point dans le cadre de collaborations ou d'ententes de licences avec un ensemble de partenaires de l'industrie pharmaceutique ou biotechnologique. Mais le plus souvent, ce sont les petites entreprises nanos en démarrage et les institutions universitaires qui mettent au point les nanoproduits.[12]

Financement des nanotechnologies par region 2005



Source : Lux Research, Inc.

Jusqu'ici, c'est l'État plutôt que l'entreprise privée qui prend l'initiative en RxD nano. On estime à 1,6 million $ les fonds consacrés à la RD nano dans le secteur des sciences du vivant en 2005 – l'industrie en a fourni un maigre 8 %.[13] Même si la majorité des 500 sociétés figurant sur la liste du magazine Fortune investissent dans la RD nano, les principales sociétés pharmaceutiques ont adopté une attitude attentiste dans le secteur des sciences du vivant – comme aux débuts de la biotechnologie. Les géants pharmaceutiques collaborent avec les jeunes entreprises en nanobio, mais comme les nanotechnologies n'ont pas fait leurs preuves et que le processus d'approbation de la FDA reste incertain, les grandes sociétés n'ont pas encore investi en masse.[14]

Une société de capital-risque a confié à *NanoBiotech News* : « Une des leçons tirées de 2005, c'est qu'il ne faut pas avoir l'air trop *nano* quand on se présente devant la FDA. Dans le cas d'une nanobille d'or, il faut dire qu'elle agit comme un colloïde d'or. Dans le cas d'un lipide, qu'il agit comme une émulsion. Du point de vue réglementaire, il faut proposer une technologie familière – sous peine d'être soumis à toute une batterie de tests supplémentaires. »[15] C'est peut-être cette stratégie qui a incité certaines sociétés à délaisser l'étiquette *nano* : Nanopharma Corporation est devenue Mersana Therapeutics et Nanocure s'appelle maintenant Avidimer Therapeutics.

De 2001 à 2007, le gouvernement des É.-U. a investi quelque 773 millions $ en RxD nano.[16] À la fin 2005, les National Institutes of Health du National Cancer Institute (NCI) des É.-U. ont accordé 26,3 millions $ en subventions de première année pour mettre sur pied huit Centers of Cancer Nanotechnology Excellence (CCNE) dans le cadre d'un projet quinquennal (2004-2009) de 144,3 millions $ – Alliance for Nanotechnology in Cancer.[17] L'Alliance du NCI vise à « utiliser la puissance des nanotechnologies pour transformer de manière radicale le diagnostic, le traitement et la prévention du cancer. »[18]

De 2003 à 2008, le 6e Programme-cadre pour la recherche de l'Union européenne consacrera 233,5 millions d'euros aux projets nanomédecine.[19]

Le gouvernement canadien a investi environ 32 millions $ CDN dans la nanomédecine de 2000 à 2006, par l'entremise des Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC), qui ont lancé un projet de médecine régénérative et de nanomédecine en 2003.[20] En 2006-2007, l'IRSC prévoit dépenser environ 15 millions $ CDN en RxD nano.

« Il est important que les percées nanotechnologiques très utiles dans le domaine de la médecine et des soins de santé ne se fassent pas aux dépens de l'humanité et de l'environnement. Il y a lieu de s'inquiéter de l'écart technologique qui risque de se creuser davantage entre pays développés et pays en développement. Les nanotechnologies vont tellement améliorer les soins de santé que tout le monde doit y avoir accès »

– Mark Morrison, éd., « Nanotechnology and its Implications for the Health of the EU Citizen », *Nanoforum*, www.nanoforum.org, décembre 2003.

Tableau 1: Médicaments et produits médicaux nanos approuvés par la FDA

Produit/Fabricant	Approbation par la FDA	Fonction
Abraxane American BioScience, Inc.	Janvier 2005	Nanoparticules contenant du paclitaxel utilisées pour augmenter la quantité de médicament anticancéreux disponible pour détruire les cellules cancéreuses du sein.
Doxil (système d'administration à base de liposomes mis au point par ALZA)	1999	Système d'administration de nanoparticules à base de liposomes enrobés de polymère, appelé Stealth. Doxil est le premier produit à incorporer cette technologie pour traiter le cancer de l'ovaire.
Emend Merck – technologie sous licence d'Elan	Approuvé	Version en nanoparticules du médicament Aprepitant, pour prévenir la nausée chez les cancéreux en chimiothérapie.
Rapamune Wyeth – technologie sous licence d'Elan	2000	Formulation en nanoparticules du sirolimus (Rapamune) pour prévenir le rejet chez les patients ayant subi une transplantation d'organe.
Silcryst Nucryst Pharmaceuticals – produit distribué par Smith & Nephew sous le nom d'Acticoat	Sur le marché depuis 1998; approuvé par la FDA pour la vente libre en 2001	Argent nanocristallin incorporé à des pansements en raison de ses propriétés antimicrobiennes.
SilvaGard AcryMed, Inc	Décembre 2005	Cathéter enrobé de nanoparticules d'argent antimicrobiennes pour usage interne.
TriCor Abbott Laboratories– technologie sous licence d'Elan	Approuvé par la FDA en novembre 2004	Formulation en nanoparticules de TriCor – un médicament pour traiter l'hypercholestérolémie.
Verigene Nanosphere, Inc.	En attente de l'approbation de la FDA (juin 2006)	Plateforme de produit *in vitro* qui teste des échantillons de sang ou de salive pour détecter les acides nucléiques et les protéines en concentrations extrêmement faibles.

« Les nanotechnologies vont modifier de façon radicale l'étude des mécanismes biologiques de base et améliorer de façon substantielle la prévention, la détection, le diagnostic et le traitement des maladies. Un des éléments clés est que les nanotechnologies opèrent à la même échelle que les processus biologiques, un atout précieux pour observer et manipuler des voies et processus biologiques fondamentaux »

– Jeffery Schloss, coprésident, National Institutes of Health Nanomedicine Roadmap Initiative[22]

Pourquoi les nanos ?

Les adeptes des nanos comptent sur ces technologies pour traiter les troubles et maladies avec une efficacité inégalée. Et cela pour une raison bien simple : elles opèrent à la même échelle que la biologie. La molécule d'ADN mesure environ 2,5 nm et l'hémoglobine (une protéine du sang qui assure le transport de l'oxygène) fait environ 5 nm de diamètre. D'un diamètre de 10 à 20 microns (10 000 à 20 000 nm), les cellules humaines sont énormes en comparaison. Cela veut dire que les matériaux et dispositifs nanos pénètrent aisément la plupart des cellules, souvent sans causer la moindre réaction immunitaire.[21] On espère concevoir des particules, matériaux et dispositifs nanos capables d'interagir avec les matériaux biologiques de façon plus directe, plus efficace et plus précise. Grâce à leur taille, ils pourront atteindre des endroits du corps – comme le cerveau et les cellules – difficiles d'accès avec les technologies actuelles. (Voir la p. 12)

Par exemple, le National Cancer Institute des É.-U. écrit que, grâce aux nanos, on pourra « entrer dans une cellule vivante [ce qui] permettra comme jamais auparavant de repousser les limites sur le plan clinique et celui de la recherche fondamentale ».[23] La possibilité d'insérer des nanosondes dans la cellule permettra de mieux saisir la complexité de son fonctionnement et de détecter très tôt les cellules anormales à l'origine du développement des maladies.[24]

Exploiter les effets quantiques

Certains nanomatériaux destinés aux applications biomédicales vont de plus démontrer des propriétés inusitées susceptibles d'accroître leur fonctionnalité. À une taille inférieure à 100 nm, les substances peuvent réagir autrement que des particules plus grosses de la même matière. À l'échelle nano, les matériaux peuvent avoir des propriétés différentes qu'à l'échelle micro ou macro – solidité, couleur, élasticité ou toxicité – et présenter une conductivité électrique ou une réactivité chimique accrues. Les propriétés optiques, électriques ou structurales particulières découlant de l'échelle nanométrique sont les *effets quantiques*. Qui plus est, les propriétés quantiques d'une substance peuvent changer *à l'intérieur* de l'échelle nano. Certaines nanoparticules d'or sont inertes, alors que leurs pareilles d'une autre taille sont réactives. La forme fait aussi une différence. Il est possible qu'une nanoparticule sphérique de 20 nm d'une substance donnée ne soit pas toxique pour les cellules, alors qu'une particule de 60 nm de la même substance en forme de bâton produit un effet cytotoxique (toxique pour les cellules). Aucun modèle ne permet de prédire les effets quantiques – un projet en cours tente d'établir les caractéristiques de certains nanomatériaux dans le but de comprendre leurs attributs physiques, leurs propriétés biologiques *in vitro* et leur compatibilité *in vivo* (essais réalisés sur des animaux dans un premier temps).[25] Entreprendre la cartographie du tout nouveau monde des nanomatériaux est une tâche colossale, sinon impossible, compte tenu de toutes les variations de substance, de taille, de forme et structure des surfaces.

Accroître la biodisponibilité

Les nanoapplications médicales ne vont pas toutes exploiter les effets quantiques. Un médicament peut être plus efficace en particules de 400 nm que de 2 microns parce qu'il est plus **biodisponible** – plus utilisable par le

corps – ou qu'il peut cibler directement une tumeur, mais il ne révélera sans doute pas de nanopropriétés uniques. Il faut généralement que la substance ait une taille inférieure à 100 nm dans au moins une dimension pour révéler des effets quantiques. On a cependant constaté des propriétés particulières à des tailles supérieures à 100 nm – entre autres, dans des **polymères** renforcés avec des nanoparticules pour lier les deux matériaux.[26]

Le projet ultime est de combiner les nanomédicaments à l'**administration ciblée de médicaments** dans le cadre d'une **médecine personnalisée** – en gestion de la santé, c'est une approche qui se fonde sur le profil génétique du patient pour détecter la prédisposition à une maladie donnée ou son niveau de réceptivité à un agent thérapeutique donné. Selon cette vision, les nanotraitements de l'avenir pourraient être des dispositifs multifonctionnels capables de détecter et d'identifier des maladies données à l'échelle cellulaire, et de dispenser au moment voulu la dose exacte du médicament approprié, selon les besoins particuliers du patient, puis de rapporter ensuite l'information en temps réel pour surveiller l'évolution de la maladie.[27]

Atomiser la pharmacopée

La nanotechnologie a déjà transformé la formulation de certains médicaments et parfois, leur reformulation. Quand un composé pharmaceutique est formulé à partir de nanoparticules, son niveau de biodisponibilité augmente. Autrement dit, le corps peut absorber un composé médicamenteux plus vite et plus facilement – et donc l'utiliser de manière plus efficace – quand le composé se présente à une échelle plus proche de celle des processus biologiques. Le taux de biodisponibilité d'un médicament est un facteur clé de son efficacité. Une firme de conseillers en recherche commerciale estime que 65 milliards $ des revenus annuels tirés des médicaments (soit presque 16 % du total des ventes) proviennent des produits pharmaceutiques à faible biodisponibilité, ce qui augmente les coûts pour le patient, nuit à l'efficacité du traitement et augmente les risques de toxicité.[28]

Établie à Dublin, en Irlande, Elan Corporation a développé un procédé exclusif pour *moudre* les composés pharmaceutiques en petites particules (d'une taille généralement inférieure à 100 nm), ce qui en accroît la biodisponibilité et en accélère l'absorption, au dire de la société.[29] Elan ajoute que les nouvelles formulations de nanomédicaments éliminent la variabilité *nourri-à jeun* (l'obligation de prendre le médicament à jeun ou non). Les grosses firmes pharmaceutiques telles que Wyeth, Merck et Abbott ont confié à Elan le soin de moudre leurs composés exclusifs. Dans la plupart des cas, ces médicaments ont déjà été approuvés (par la FDA) sous forme classique et, pourvu que les firmes puissent en démontrer la *bioéquivalence*[30] (différence *négligeable sur le plan médical* entre l'action de la nouvelle et de l'ancienne formulation), la nanoversion n'est soumise à aucun examen réglementaire – de nouveaux essais cliniques, par exemple.

Les firmes pharmaceutiques comptent sur les nanoformulations pour *relancer* des médicaments sous-performants… et *relancer* leurs profits. Il peut arriver que des médicaments plus anciens – retirés du marché en raison de leur faible efficacité ou de leurs effets secondaires chez certains groupes de patients – soient plus efficaces ou plus sûrs en nanoformulations, ce qui réduit considérablement les coûts liés à la mise au point du médicament.

Les sociétés pharmaceutiques profitent déjà d'une protection prolongée des brevets grâce aux nanoformulations.[32] Si elles n'arrivent pas à démontrer la

Une firme de conseillers en recherche commerciale estime que 65 milliards $ des revenus annuels tirés des médicaments (soit presque 16 % du total des ventes) proviennent des produits pharmaceutiques à faible biodisponibilité, ce qui augmente les coûts pour le patient, nuit à l'efficacité du traitement et augmente les risques de toxicité.[28]

« La reformulation de médicaments dans des nanodispositifs à caractère sélectif ne coûte pas cher et exige très peu de temps… Compte tenu du nouveau régime de brevets, il faut s'intéresser davantage à la mise au point de nouvelles nanoformulations de médicaments qui ne sont plus protégés par un brevet… »

– A.N. Maitra, chimiste, Université de Delhi, Inde[31]

* *Les mot en caractères gras dans le texte sont définit dans le glossaire en page 47 et 48.*

Les sociétés pharmaceutiques profitent déjà d'une protection prolongée des brevets grâce aux nanoformulations.[32]

bioéquivalence des versions classique et nano du même médicament, elles ont tout de même un avantage stratégique aux É.-U. : le détenteur du brevet dispose de trois ou cinq ans d'*exclusivité sans brevet* pendant les nouveaux essais cliniques du médicament.[33] Indépendante des droits de brevet, cette période avantage les géants pharmaceutiques en écartant les fabricants de médicaments génériques à prix inférieur.[34]

« Les nanotechnologies sont de plus en plus utilisées par une poignée de firmes axées sur l'avenir pour donner un second souffle à de vieux médicaments en augmentant leur efficacité… Si l'industrie décidait de reformuler un médicament existant plutôt que d'en développer un nouveau, cela aurait pour effet de [réduire les coûts de développement de façon substantielle], d'allonger le cycle de vie de la protection des brevets et d'augmenter les ventes de plusieurs millions.»

– Lux Research, Inc.[35]

Encadré 2 : Multiplier les médicaments : la meilleure arme contre les maladies ?

Dans un article marquant – même si ce n'était pas le seul du genre – paru en 1977, J.B. et S.M. McKinlay ont remis en question l'impact des interventions médicales sur la baisse des taux de mortalité aux É.-U. depuis 1900.[3] Ils ont conclu que les interventions médicales étaient responsables d'au plus 3,5 % de cette baisse (de 1900 à 1973). Leurs données démontrent que pour plusieurs maladies infectieuses (tuberculose, fièvre typhoïde, rougeole et scarlatine), les interventions médicales sont arrivées des dizaines d'années après qu'on eut constaté une baisse marquée de la mortalité. Avant celle des McKinlay, d'autres études avaient déjà démontré l'impact minime des interventions médicales sur la baisse de mortalité (en Europe)… et d'autres ont confirmé le fait par la suite. Considérée comme une *hérésie des temps modernes* en 1977, la thèse de l'impact minime des interventions médicales sur les taux de mortalité apparaît tout à fait *orthodoxe* en 2003,[4] vu les preuves indubitables fournies par des études antérieures et postérieures à celle des McKinlay. Cela ne signifie pas qu'elle soit adoptée avec enthousiasme en dehors d'un petit cercle d'initiés, ni même qu'elle soit connue – on admet seulement qu'elle repose sur des données statistiques fiables. En général, les études laissent entendre que la baisse des taux de mortalité serait en fait attribuable à une meilleure nutrition et à une moindre exposition aux maladies grâce à l'amélioration des conditions d'hygiène.

Il y a près de trente ans, les McKinlay saisissaient les implications profondes de l'acceptation ou du rejet de la thèse de l'impact minime de la médecine sur la baisse des taux de mortalité :

> Si on souscrit à la thèse que, lentement mais sûrement, nous sommes en train d'éliminer l'une après l'autre toutes les maladies grâce aux interventions médicales, on s'intéressera peu au changement social et on hésitera même à remanier les priorités en matière de dépenses médicales… s'il est démontré hors de tout doute raisonnable, selon des normes reconnues, que la plus grande partie de la baisse de la mortalité n'a rien à voir avec les soins médicaux, cela pourrait susciter un désir de changement social et un remaniement des priorités.[5]

Il n'est pas étonnant que l'impact de la médecine prête à controverse. Le monde universitaire proche de l'industrie conteste depuis peu la thèse de l'impact minime.

À la fin 2003, le Dr Frank Lichtenberg, économiste à la Columbia Business School (New York, É.-U.), a présenté une conférence au Center for Medical Progress du Manhattan Institute. L'Institut « transforme l'intellect en influence » et la mission du Centre consiste à « traduire l'importance du progrès médical et démontrer que les institutions du libre marché rendent le progrès médical à fois possible et largement accessible partout dans le monde. »[6] Lichtenberg cite une étude dans laquelle il a examiné le lien entre l'introduction de nouveaux médicaments et la prévalence des maladies dans 52 pays, de 1982 à 2001. L'étude démontre que « les nouveaux médicaments ajoutent environ trois semaines par année à la longévité moyenne des personnes [souffrant de la maladie ciblée par le nouveau médicament]. »[7] Ces résultats l'ont convaincu que l'extension de la longévité imputable aux nouveaux médicaments vaut amplement l'investissement social. Plus récemment (mars 2006), Lichtenberg a recueilli des données sur l'effet de l'introduction de nouvelles applications de laboratoire et autres innovations médicales aux États-Unis de 1990 à 2003. Il conclut que « dans les cas de troubles médicaux où il y a eu le plus d'innovations pharmaceutiques en laboratoire et pour les patients externes, l'âge moyen au décès a connu une augmentation plus importante ». Cela confirme son hypothèse : « plus il y a d'innovation médicale en rapport avec un trouble médical donné, plus on voit s'améliorer la santé moyenne des personnes affectées par ce trouble ».[8] (Cela repose évidemment sur l'hypothèse que la moyenne de la population a accès à l'innovation.)

Les études précédentes et les travaux récents de Lichtenberg doivent-ils nous inciter à croire que les interventions médicales ont commencé à contribuer à l'amélioration de la santé seulement pendant les vingt dernières années du XXe siècle? Dans un tel cas, comment expliquer un changement aussi soudain? C'est plus qu'un exercice théorique : si on peut déterminer avec précision le rendement du capital investi dans les nouvelles interventions médicales, cela pourra exercer un impact majeur sur les politiques publiques en aidant à fixer des priorités budgétaires, y compris dans le domaine de la RD. Les National Institutes of Health des É.-U., par exemple, doivent décider chaque année de la façon la plus judicieuse d'utiliser plus de 28 milliards $ tirés des poches des contribuables. Mais comment les décideurs peuvent-ils s'assurer d'obtenir des données et des analyses aussi désintéressées que possible? Parmi ses sources de financement, Lichtenberg mentionne des géants de l'industrie pharmaceutique comme Pfizer et Merck, et il a travaillé comme expert-conseil pour le National Pharmaceutical Council.[9] Est-il possible qu'il protège – à son insu – les intérêts de l'industrie médicale? Les responsables des politiques et la société en général doivent trouver le moyen de bien saisir l'impact historique des technologies médicales – et l'impact éventuel des technologies qu'on est en train de mettre au point. (Voir CIENT à la p. 45, ci-dessous.)

« … s'il est démontré hors de tout doute raisonnable, selon des normes reconnues, que la plus grande partie de la baisse de la mortalité n'a rien à voir avec les soins médicaux, cela pourrait susciter un désir de changement social et un remaniement des priorités.»

Ironiquement, c'est en raison des qualités si intéressantes aux yeux des chercheurs et de l'industrie dans une foule de domaines, dont la médecine – taille réduite, mobilité et propriétés inédites – que les nanomatériaux peuvent être préjudiciables à la santé des personnes.

Nouveauté et mobilité des nanos : les effets pervers

Les propriétés exceptionnelles des nanomatériaux font miroiter la possibilité de traitements médicaux beaucoup plus efficaces et de diagnostics améliorés, entre autres grâce à la précision accrue de l'imagerie médicale. À cause de leur taille, les nanomatériaux peuvent atteindre des cellules et des parties du corps inaccessibles aux thérapies actuelles. Les effets quantiques – propriétés optiques, électriques ou structurales inusitées du seul fait de l'échelle nano – révélés par certains matériaux peuvent accroître leur fonctionnalité. (Voir les points quantiques ci-dessous.) Ironiquement, c'est en raison des qualités si intéressantes aux yeux des chercheurs et de l'industrie dans une foule de domaines, dont la médecine – taille réduite, mobilité et propriétés inédites – que les nanomatériaux peuvent être préjudiciables à la santé des personnes.

Les scientifiques admettent qu'on ne sait pas grand-chose de la toxicologie des nanomatériaux synthétiques, et qu'on ne peut inférer leur toxicité éventuelle à partir des études toxicologiques réalisées sur des particules de taille supérieure.[36] Autrement dit, la toxicité d'une substance sous forme de particule d'un micron de diamètre sera sans doute différente de celle d'une particule (de la même substance) qui fait seulement 10 nm de diamètre (1 micron = 1000 nm). C'est que plus la particule est petite, plus grande est la proportion d'atomes en surface. Une grande surface correspond à un taux de réactivité élevé – et en général, plus une substance est réactive, plus elle est toxique. Mais les vérités d'hier ne tiennent pas forcément la route à l'échelle nano. À cette échelle (~1-100 nm), les matériaux ont des réactions imprévisibles; des scientifiques avancent depuis peu que la forme et la structure des surfaces des nanomatériaux seraient aussi des facteurs importants de la réactivité et de la toxicité, ajoutant à la complexité de la nanotoxicologie.[37]

Il faut s'attaquer de toute urgence à cette lacune des connaissances, parce qu'il y a déjà des centaines de produits contenant des nanomatériaux sur le marché,[38] et qu'aucun appareil fédéral au monde n'est à proprement parler responsable de la réglementation des nanomatériaux.

Du fait de la biodisponibilité accrue à l'échelle nano, il faudra surveiller avec grand soin le dosage des médicaments nanoformulés, parce qu'ils *cognent plus dur* que leurs équivalents classiques – le surdosage peut entraîner de graves problèmes. La mobilité accrue peut constituer un autre inconvénient. Il est très utile d'avoir accès au cerveau pour traiter des cancers, par exemple, mais il ne faut pas laisser la porte ouverte à toutes les nanoparticules synthétiques auxquelles le corps peut être exposé – dans l'environnement ou par le truchement de nanoproduits commerciaux. Une étude récente laisse entendre que la réactivité accrue des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2), un ingrédient courant des écrans solaires, peut endommager les microglies du cerveau – des cellules chargées de protéger le système nerveux central.[39] Même si plusieurs écrans solaires et cosmétiques sur le marché contiennent des nanoparticules, dont celles de TiO_2, les scientifiques ne savent pas dans quelle mesure les nanoparticules peuvent traverser la peau. Même les nanomatériaux à usage interne – agents d'imagerie ou médicaments ciblés

– peuvent poser problème s'ils dévient de leur cible et s'installent à demeure dans nos cellules, notre cerveau ou d'autres organes.

Analysant les perspectives des nanos dans le secteur de la santé, Frost & Sullivan, une firme de conseillers en recherche commerciale, fait une mise en garde : « Les nanoparticules et nanomatériaux utilisés dans les découvertes pharmaceutiques peuvent poser problème s'ils se dégradent trop vite ou restent trop longtemps dans l'organisme. Vu la faculté des nanomatériaux d'interagir avec les organismes biologiques, ils risquent d'être nocifs pour l'être humain et pour l'environnement… On connaît peu la toxicité éventuelle des nanoparticules, mais selon les recherches, certains de ces produits peuvent entrer dans le corps humain et devenir toxiques à l'échelle cellulaire dans divers liquides organiques, tissus ou organes. »[40]

Particules sans frontières?

Les nanoparticules inhalées peuvent-elles atteindre le système nerveux central? Les nanoparticules des cosmétiques et des écrans solaires peuvent-elles traverser les couches de la peau? Peuvent-elles pénétrer la barrière hémato-encéphalique? À quelle taille peuvent-elles franchir la paroi d'une cellule? On ne sait pas grand-chose de la translocation (le déplacement) éventuelle des nanoparticules dans le corps. La taille de la particule, sa composition et sa forme seraient des facteurs déterminants. Une étude récente démontre ainsi que les particules sphériques (certaines d'un diamètre de 14 nm et d'autres, de 74 nm) ont pénétré les cellules plus facilement que des nanoparticules en forme de bâtons mesurant 14 nm x 74 nm.[41] Les particules sphériques de 50 nm étaient cependant deux fois plus susceptibles de pénétrer les cellules que des particules sphériques légèrement plus grosses *ou* plus petites.[42] Une étude réalisée sur des rats démontre que les nanoparticules inhalées d'une taille inférieure à 40 nm peuvent atteindre le cerveau (plus précisément le bulbe olfactif) en passant par le nerf olfactif.[43] Cette découverte peut avoir une importance particulière en rapport avec l'administration des médicaments et la nanotoxicologie, parce qu'elle laisse entendre que les nanoparticules sont capables de déjouer la barrière hémato-encéphalique, réputée infranchissable.

Il faut s'attaquer de toute urgence à cette lacune des connaissances, parce qu'il y a déjà des centaines de produits contenant des nanomatériaux sur le marché,[38] et qu'aucun appareil fédéral au monde n'est à proprement parler responsable de la réglementation des nanomatériaux.

De la thérapie à l'amélioration : l'*Homo sapiens* posthumain

C'est peut-être dans le domaine des technologies d'amélioration des facultés humaines (AFH) que la convergence aura le plus d'impact et générera le plus de profits.

« Les nanotechnologies peuvent transcender les limites de la biologie.»

– Ray Kurzweil cité dans *Scientific American*, juillet 2006

Les nanotechnologies serviront-elles à combattre la santé?

Alors que l'État, l'industrie et le monde scientifique, notamment dans les pays de l'OCDE, s'empressent de souligner à quel point les nanotechnologies pourront s'attaquer aux troubles de la santé, les percées dans les *technologies convergentes* – nanotechnologies, biotechnologie, technologies de l'information, neurotechnologie et sciences cognitives – permettront bientôt de s'attaquer aux imperfections de la santé ou aux *prétendus* troubles de la santé. C'est peut-être dans le domaine des technologies d'amélioration des facultés humaines (AFH) que la convergence aura le plus d'impact et générera le plus de profits.

La convergence technologique permettra en théorie d'augmenter la structure, la fonction et les facultés du corps et du cerveau humains. On ne rêve pas seulement d'éliminer les handicaps et de guérir les maladies, mais bien de produire des corps plus robustes et plus rapides que ceux des athlètes les plus performants d'aujourd'hui, avec des cerveaux revampés capables de retenir plus d'information et de communiquer directement avec un ordinateur, des membres artificiels ou d'autres cerveaux. On a ainsi créé un implant neuronal artificiel – déjà approuvé par la FDA pour utilisation clinique – en vue de remplacer les neurones endommagés par la maladie de Parkinson. Le dispositif permet de télécharger des mises à niveau des logiciels directement d'un ordinateur *ex vivo* vers l'implant installé dans le corps.[44] À l'heure actuelle, ces dispositifs sont réservés aux personnes malades; dans un proche avenir, il sera plus difficile de faire la distinction entre maladie et santé imparfaite, entre thérapie et amélioration. (Voir le BANG, pp. 22.)

Pour couronner le tout, le nouveau corps amélioré issu des technologies convergentes pourrait vivre bien au-delà de cent ans. Selon le gouvernement des É. U., les technologies qui convergent à l'échelle nano vont « améliorer les facultés humaines » au travail, dans les sports, à l'école et sur le champ de bataille. Intelligence téléchargée en amont, mémoire téléchargeable et corps hyperperformant : il faudra peut-être redéfinir notre espèce, l'*Homo sapiens*. À moins que la nouvelle réalité technologique entraîne la création d'une nouvelle classe d'êtres humains, l'*Homo sapiens 2.0*, pour décrire l'infime partie de la population mondiale qui pourra se payer les améliorations issues des technologies convergentes.

C'est la minorité qui pourra s'offrir le traitement complet, mais certaines améliorations issues des technologies convergentes deviendront de plus en plus courantes et *naturelles*, jusqu'à être perçues comme des correctifs aussi nécessaires que les lunettes de nos jours. Parallèlement à cela, l'industrie poussera la société à définir de façon de plus en plus large les *problèmes de santé* remédiables – sous couvert de sensibilisation – afin de créer ou d'étendre le marché des nouvelles améliorations. Promouvoir une maladie dans le but de créer de nouveaux marchés pour la traiter, c'est de l'**alarmisme médical**.[45] Certains traits personnels (la timidité), physiques (la force ou la taille *moyennes*) ou cognitifs (l'intelligence *normale*) seront jugés indésirables et remédiables

– pour devenir peu à peu inacceptables et intolérables. Déjà floue, la frontière entre amélioration et thérapie disparaîtra complètement. L'effet ultime sera la transformation de ce qui est considéré *normal* et la création d'un « fossé des capacités », selon les termes utilisés par le Dr Gregor Wolbring, biochimiste et chercheur en santé à l'Université de Calgary.[46] Comme le fossé numérique, le fossé des capacités divisera le Nord du Sud, et les riches des pauvres d'un bout à l'autre de la planète. Dans le contexte politique actuel, l'introduction généralisée de technologies d'amélioration des facultés humaines entraînera la marginalisation d'un nouveau groupe de personnes, avec le *fossé* que cela implique.

Certains réitèrent qu'il est possible de faire la distinction entre thérapie et amélioration, et qu'il *faut* la faire, parce que cette distinction pourra éclairer le débat éthique sur ce qui définit l'être humain et sur la meilleure façon de préserver notre humanité.[48] D'autres objectent que le schéma social actuel ne permet pas de maintenir la distinction entre thérapie et amélioration. Selon eux, il faut amorcer un débat inclusif en cernant dans un premier temps les facteurs sociaux (valeurs, préjugés, etc.) qui déterminent notre conception actuelle de l'être humain. Il faut ensuite examiner la façon (et l'opportunité) de protéger les personnes qui ne cadrent pas avec la norme d'*humanité* actuelle et celles qui ne cadreront pas avec les nouvelles normes de notre avenir amélioré par la technologie.[49] D'autres encore – les transhumanistes, par exemple, qui croient que la race humaine est à un stade rudimentaire – se satisfont d'une définition flexible de l'*Homo sapiens* et ils ont hâte d'utiliser les technologies capables d'*améliorer* l'être humain.[50] (Voir la p. .) Ils rêvent d'un avenir pas si lointain où une *cure* de jouvence permettra de guérir la *maladie* du vieillissement pour vivre en santé bien au-delà de 100 ans – qui sait, grâce aux progrès des *SENS*, les Stratégies pour Endiguer les effets Néfastes de la Sénescence.[51] Certains transhumanistes admettent que l'introduction systématique de technologies d'amélioration risque de creuser l'écart entre riches et pauvres, mais cela ne leur semble pas une raison suffisante pour en limiter l'utilisation. Pour eux, les inégalités sociales sont un problème distinct – et de longue date – qui n'est pas isssu des technologies d'amélioration et qu'elles ne régleront pas non plus.[52]

Jogger sur le tapis roulant de l'amélioration… y a-t-il un bouton d'arrêt?

La société fait bon accueil à la plupart des améliorations visant à guérir ou traiter les personnes considérées comme malades ou handicapées. Quelques améliorations sont mises au point pour des groupes « en santé » ayant des besoins pointus, comme les soldats au combat. Même si les améliorations sont censément destinées à une *clientèle* limitée, l'expérience démontre que leur popularité monte en flèche peu après leur introduction, pour des usages tout à fait différents de ce pour quoi ils ont été conçus. Cela a des répercussions pratiques que la société n'avait pas pleinement prévues.

L'hormone de croissance humaine transgénique, par exemple, a été approuvée par la FDA en 1985 pour traiter le nanisme – un état caractérisé par une taille anormalement petite, causé le plus souvent par une mutation génétique spontanée.[53] De nos jours, on prescrit l'hormone de croissance humaine (avec l'approbation de la FDA) à des enfants en santé, trop petits au goût de leurs parents. Ces derniers disent que leur enfant souffre de *petite taille idiopathique* – soit d'origine inconnue. Autrement dit, ils n'ont aucun symptôme de maladie, ils sont

« Chaque technologie a engendré la marginalisation d'un nouveau groupe et de nouvelles inégalités. Je ne vois pas pourquoi il en irait autrement dans le contexte politique actuel, si le corps humain devient le nouveau seuil de marchandisation. La technologie d'amélioration de l'être humain sera aussi habilitante pour une petite minorité que débilitante pour la majorité… Si la tendance se maintient, nous verrons apparaître une nouvelle classe de marginaux – les non-améliorés.»[47]

– Dr Gregor Wolbring, Université de Calgary

Comme le fossé numérique, le fossé des capacités divisera le Nord du Sud, et les riches des pauvres d'un bout à l'autre de la planète..

juste intolérablement petits! L'hormone de croissance est utilisée couramment par des athlètes de toutes tailles pour améliorer leurs performances. On vante aussi abondamment les propriétés antivieillissement de l'hormone de croissance.[54] Le *traitement* n'est pas donné – l'hormone de croissance coûte 20 000 $ par année et on la prescrit généralement pendant quatre ou cinq ans.[55] Son marché mondial atteindrait environ 2 milliards $ par année.[56]

Cela pose problème d'étendre l'utilisation de l'hormone de croissance à une population en santé. Comme l'explique le Dr Michael Freemark dans un éditorial du *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, « Le terme *petite taille idiopathique* laisse croire à une maladie [même si] le risque majeur de cet état est une prédisposition accrue à la discrimination. Mais la discrimination est une *maladie* de la société, pas de la petite personne. Pour combattre l'intolérance sociétale, il faudrait en principe adopter des lois contre la discrimination et les appliquer, éduquer la population et conseiller les familles – plutôt que de traiter l'enfant. »[57]

Freemark poursuit en démontrant comment l'arrivée d'une amélioration peut modifier la perception sociale de ce qui est normal ou acceptable : « En l'absence de maladie, il n'y a aucune base rationnelle pour établir un seuil de traitement. Par exemple, comment justifier que l'on traite un garçon dont la prédiction de croissance est de 5'3 et qu'on refuse de traiter celui qui devrait mesurer 1/32e de po de plus à l'âge adulte? Qui plus est, l'utilisation de la GH [hormone de croissance] chez les enfants très petits peut avoir un effet domino; si la taille finale des enfants de très petite taille augmente, on classera comme souffrant de *petite taille idiopathique* des enfants autrefois considérés comme normaux (petits, mais en deçà des seuils actuels). **C'est la première fois que le traitement d'un groupe d'enfants aura pour effet de créer une maladie chez un autre groupe auparavant en santé. »** (c'est nous qui soulignons)

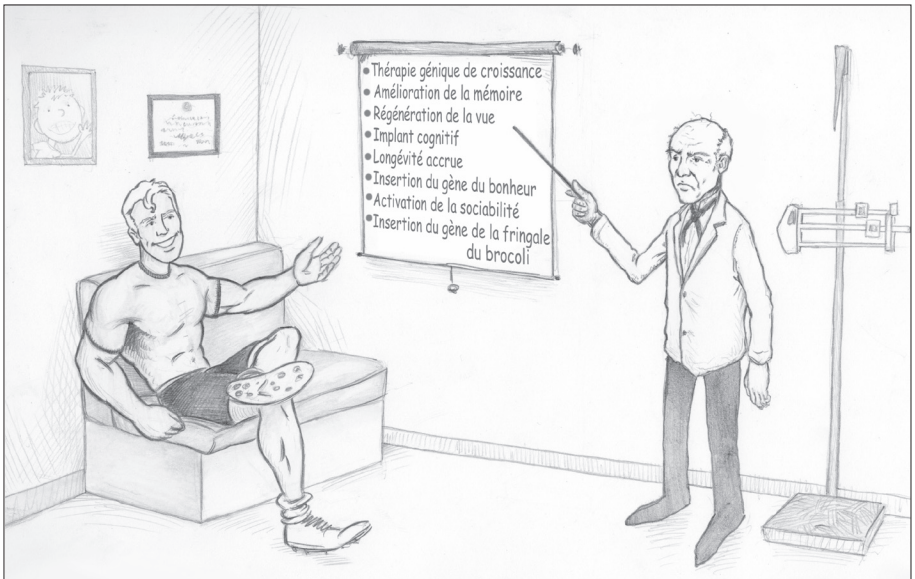
Malheureusement, l'hormone de croissance ne sera pas le seul cas où l'application des AFH sans qu'il y ait maladie rendra *malade* des gens en santé. En voici quelques exemples :

- **Stimulation magnétique transcrânienne (SMT) :**
  La SMT est une procédure de stimulation externe de certaines zones du cerveau par un champ électromagnétique. Elle aide à déceler les fonctions des zones du cerveau qui sont activées (ou désactivées), mais elle peut aussi servir au traitement de troubles cérébraux, y compris la maladie de Parkinson voire la dépression. Grâce à des champs magnétiques qui *allument* (ou *éteignent*) diverses zones du cerveau, les chercheurs ont découvert que des personnes *normales* peuvent accroître leur puissance mentale de façon spectaculaire. Une étude récente menée par le professeur Allan Snyder au Centre for the Mind – un projet conjoint de l'Université nationale d'Australie et de l'Université de Sydney – démontre que la SMT répétée du lobe temporal antérieur gauche améliore la capacité des participants de deviner le nombre d'éléments affichés sur un écran d'ordinateur. Ce talent disparaît une heure plus tard.[58] Combien de temps avant que les pauses-café se transforment en pauses SMT? Se sentira-t-on obligé d'adopter la stimulation cérébrale pour garder un avantage concurrentiel au travail? Jusqu'à quel point faudra-t-il survolter notre cerveau?

- **Traitement de la privation de sommeil :**
  Ils ne sont pas destinés aux victimes d'insomnie ou d'autres troubles du sommeil; de fait, ils ont pour but d'aider à supporter la privation de sommeil. À l'avant-garde de la recherche sur la privation de sommeil, l'armée des É.-U. a financé des douzaines de projets, dont des études sur l'utilisation possible de la SMT pour réduire le besoin de sommeil.[59] La DARPA (US's Defense Advanced Research Projects Agency) explique pourquoi elle s'intéresse tellement à la question : c'est que le succès des opérations militaires « repose sur la capacité du combattant de fonctionner sur une période prolongée en étant privé du nombre adéquat d'heures de sommeil. »[60] Comme la SMT, la privation de sommeil va-t-elle devenir un mode de vie pour les personnes qui veulent un avantage concurrentiel et peuvent se payer le traitement ou les médicaments requis? Va-t-on forcer des travailleurs – les routiers, par exemple – à entreprendre une *thérapie* de privation de sommeil pour étirer leurs quarts de travail? Quels seront les effets sociétaux (et sur la santé) d'une armée de morts-vivants, et qu'arrivera-t-il si une proportion croissante de la population souffre d'un manque chronique de sommeil?

- **Chirurgie oculaire au laser :**
  Il est maintenant possible, dans certains cas, de rétablir parfaitement la vision (20-20) par chirurgie oculaire correctrice. On réalise chaque année des millions d'interventions – il y en aurait eu 1,6 million en 2005 aux É.-U. seulement.[61] Le nombre d'interventions augmente sans cesse et on s'attend à ce que le mouvement continue. Comme la plupart des gens ne considèrent pas les lunettes comme une amélioration *facultative*, la vision parfaite – ou plus que parfaite – de la majorité aura-t-elle des effets dont il faut tenir compte? Le *New York Times* notait récemment que l'Académie navale des É.-U. offre depuis cinq ans à tous ses enseignes (qui en ont besoin) une chirurgie oculaire correctrice sans frais.[62] Moins de 30 % de la promotion 2006 a refusé l'intervention (le nombre de refus diminue chaque année). Cela exerce un effet pervers : depuis cinq ans, l'Académie navale ne parvient pas à atteindre son quota annuel de recrues pour les postes d'officiers dans le corps des sous-marins. Par tradition, les sous-marins héritent du personnel prometteur ayant une vision imparfaite. L'aviation – le premier choix des officiers de marine, qui exige une vision parfaite – est dorénavant une option viable pour plus de candidats. Quels changements sociétaux faut-il prévoir au fur et à mesure que se généraliseront ces améliorations – et d'autres, plus extrêmes? Comment réagir aux impacts que nous n'avons pas prévus?

Malheureusement, l'hormone de croissance ne sera pas le seul cas où l'application des AFH sans qu'il y ait maladie rendra malade des gens en santé.



« Si vous me donnez la nausée, qui va avoir besoin de traitement? »

Tableau 2 : Des technologies qui appliquent/pourraient appliquer les AFH

Le tableau suivant présente des technologies offertes ou en cours de mise au point, précisant celles qui utilisent les nanotechnologies de manière explicite. Certaines ont été ou sont mises au point dans le but d'améliorer les facultés; dans le cas des autres, c'est après la mise au point initiale que ce potentiel a été ou sera exploité. La liste n'est pas exhaustive et certaines catégories n'y apparaissent pas du tout (chirurgie esthétique, ingénierie tissulaire, par exemple).

Produit	Société	Sur le marché?	Usage initial	Autre usages
Médicaments oraux/topiques, y compris les améliorants cognitifs				
Agents bêta-bloquants	Diverses sociétés	Oui	Insuffisance cardiaque congestive	Réduction de l'anxiété – utilisé par ex. par les musiciens avant un concert
Aurorix (ingrédient actif : moclobémide)[1]	F. Hoffman-La Roche	Oui	Antidépresseur	Phobies sociales
Inhibiteurs spécifiques du recaptage de la sérotonine (SSRI), Celexa, Desryl, Effexor, Luvox, Paxil, Prozac, Serzone, Zoloft, etc.)	Diverses sociétés	Oui	Antidépresseur	Troubles anxieux – anxiété généralisée, trouble panique, phobie sociale (timidité), névrose obsessionnelle, stress post-traumatique
Rogaine (ingrédient actif : minoxidil)	Pfizer	Oui	Hypertension artérielle[2]	Favorise la pousse des cheveux
Viagra (ingrédient actif : sildénafil)	Pfizer	Oui	Dysfonction érectile, impuissance	Amélioration de la performance sexuelle
HT-0712 (inhibiteur de la phosphodiestérase-4)	Helicon Therapeutics, Inc. (É.-U.), Inflazyme Pharmaceuticals (Canada)	Phase IIa des essais cliniques	Maladie d'Alzheimer, troubles de la mémoire associés au vieillissement	Usage prévu dans divers contextes exigeant de la vigilance
Alertec (Canada), Provigil (É.-U.) (ingrédient actif : modafinil)	Cephalon	Oui	Narcolepsie	Syndrome d'apnée/hypopnée (OSAHS), troubles du sommeil liés au travail par quarts (SWSD), dépression, sclérose en plaques, Alzheimer; privation de sommeil chez les soldats
Aricept (ingrédient actif : donepezil HCl)	Pfizer, Eisai Co., Ltd	Oui	Maladie d'Alzheimer	Utilisé sur une base expérimentale par des pilotes d'avion pour mieux mémoriser des ordres complexes dans le contrôle de la circulation aérienne[3]
Améliorants cognitifs divers	Diverses sociétés	>40 en mise au point clinique[4]	Déficits cognitifs légers (MCI), maladie d'Alzheimer, troubles de la mémoire associés au vieillissement	Usage prévu dans divers contextes exigeant de la vigilance
SPI-1005	Sound Pharmaceuticals (É.-U.)[5]	Phase I des essais cliniques	Prévention et traitement de la perte auditive causée par le bruit	
Interfaces cerveau-machine *invasifs*				
Système d'interface neural Braingate[6]	Cyberkinetics Neurotechnology Systems Inc. (É.-U.)	Essais cliniques pilotes	Capteur implanté sur le cortex moteur associé à un dispositif qui mesure et interprète les signaux du cerveau; permet de contrôler un ordinateur par la pensée pour amorcer une série d'activités	

Produit	Société	Sur le marché?	Usage initial	Autre usages
Interfaces cerveau-machine *non invasifs*				
MAIA – Accroissement mental par détection de l'action recherchée[7]	IDIAP (Suisse), Katholieke Uni Leuven (Belgique), Uni Hospital de Genève, Fondazione Santa Lucia-Rome, Université de technologie d'Helsinki	Mise au point	Utilisation de la pensée (signaux d'EEG) pour contrôler un fauteuil roulant à l'intérieur; contrôler un bras robotique; réagir en cas d'urgence (freiner un véhicule ou rentrer un bras robotique)	
Casque virtuel[8]	University College de Londres	Mise au point 2011-2016	Transformation des ondes cérébrales (signaux d'EEG) en actions pour permettre aux personnes gravement handicapées de contrôler par la pensée des fauteuils roulants, des ordinateurs et des membres artificiels	
Machine à écrire mentale, interface cerveau-machine Berlin (BBCI)[9]	Fraunhofer Institute et Charité Campus Benjamin Franklin (Berlin)	Prototype	Amplification des signaux d'EEG et transmission à l'ordinateur pour choisir les lettres par la pensée (au moyen d'un curseur)	
Stimulation vestibulaire galvanique[10]	Nippon Telegraph & Telephone Corp. (Japon)	Mise au point; prototype	Modification du sens de l'équilibre par l'application de courant électrique à basse tension par le truchement d'un casque d'écoute; pour le divertissement ou pour aider les personnes éprouvant des problèmes d'équilibre	Militaire : un fournisseur de la Défense (Invocon, Texas, É.-U.) étudie la possibilité de décocher des impulsions électromagnétiques dans les oreilles pour maîtriser un sujet
Système de vision par ordinateur relié au cortex – C3 Vision[11]	Université Columbia, avec des fonds de la Defense Advanced Research Projects Agency (É.-U.)	Mise au point; prototype	Pendant que le porteur d'un casque d'EEG regarde des séquences vidéo, un ordinateur marque les images qui déclenchent un signal cérébral et les trie selon la puissance du signal. Par la suite, on revoit seulement les images marquées; pour la surveillance et la collecte de renseignements	
Interface cerveau-cerveau				
Électrodes implantés dans le bras, reliés à un ordinateur par signal radio, qui connectent les systèmes nerveux de Kevin et Irena Warwick[12]	Université de Reading (R.-U.)	Expéri-mental	Stade rudimentaire d'un *cerveau mondial* assisté par ordinateur	
Organes bioniques				
Oreille bionique, avec mise à niveau des logiciels[13]	Diverses sociétés, dont Advanced Bionics, Cochlear, Inc. (Australie), MED-EL (R.-U.), Laboratoires MXM (France)	Oui	Rétablir l'audition en cas de pertes auditives sévères à profondes	À l'avenir, les organes bioniques pourraient servir aux personnes dites handicapées et aux personnes en santé désirant des facultés supérieures
Jambe bionique	Diverses sociétés, dont Otto Bock HealthCare (Allemagne, Victhom Human Bionics (Canada)	Oui	Remplacer les jambes de personnes amputées, ou nées sans jambes ou sans pieds	

Produit	Société	Sur le marché?	Usage initial	Autre usages
Bras bionique[14]	Revolutionizing Prosthetics Program – DARPA (É.-U.)	Essais cliniques prévus en 2009	Remplacer les bras de personnes amputées	
Œil bionique[15] (rétine artificielle, prothèse rétinienne)	Diverses sociétés et universités, dont Second Sight Medical Products (É.-U.), VisionCare Ophthalmic Technologies (É.-U.), IIP-Technologies GmbH (Allemagne), Sumipro (Pays-Bas); Univ. du Texas (É.-U.) essaient de remplacer les nerfs qui détectent la lumière par une combinaison de nanoparticules et de nanotubes de carbone[16]	Mise au point; essais cliniques limités, quelques-uns sur le marché d'ici 2008	Rétablir la vue	
Genou bionique	*Rheo Knee* – Ossur (Islande)[17]	Oui	Remplacer les genoux endommagés	
Main bionique – *Cyberhand*[18]	Consortium d'universités européennes	Mise au point; disponible à la fin 2007	Remplacer les mains endommagées ou manquantes	
Chirurgie reconstructive du cerveau à l'aide de nanofibres pour reconstituer les connexions endommagées[19]	MIT (É.-U.), Université de Hong Kong et Université Fourth Military Medical (Chine)	Mise au point; essais sur l'être humain ~2009	Rétablir les capacités de victimes d'accidents vasculaires cérébraux ou autres dommages	
Os artificiel à base de matériaux composites en céramique[20]	Materials Science Division du Lawrence Berkeley National Laboratory (É.-U.)	Mise au point	Améliorer les greffes osseuses utilisées dans le remplacement de la hanche et du genou	
Neuro-implants (du système nerveux central)				
Hippocampe artificiel[21]	Diverses universités aux É.-U.	Mise au point; ~2019	Puces de silicium imitant la partie du cerveau responsable des souvenirs; utilisé à l'origine pour traiter la maladie d'Alzheimer	Pourrait servir à télécharger de l'information dans le cerveau
Implantation de neurostimulateurs (stimulation cérébrale profonde, voir aussi stimulation magnétique transcranienne, ci-dessous)[22]	St. Joseph's Hospital (É.-U.); collaboration Université de New York/MIT – utilisation de nanofils pour connecter un dispositif de stimulation au cerveau (É.-U.); Université Bristol et le Queen Elizabeth II Hospital à Welwyn Garden City (R.-U.), entre autres	Oui (mise au point de la stimulation cérébrale profonde par nanofils)	Dispositif similaire à un stimulateur cardiaque implanté dans la poitrine, auquel on ajoute des fils souples implantés dans le cerveau; le stimulateur envoie des impulsions électriques au cerveau pour traiter la maladie de Parkinson, les migraines et la douleur chronique	Dépression, névrose obsessionnelle, mobilité accrue des victimes d'AVC, sevrage des toxicomanes
Stimulation du nerf vague[24]	Cyberonics, Inc.	Oui	Générateur similaire à un stimulateur cardiaque implanté dans la poitrine, qui envoie des impulsions électriques au cerveau par le nerf vague dans le cou pour contrôler les crises d'épilepsie	Dépression réfractaire au traitement (approuvé en 2001 au Canada et en Europe; en 2005 aux É.-U.

Produit	Société	Sur le marché?	Usage initial	Autre usages
Anticorps Anti-Nogo-A[25]	Novartis Pharma, entre autres	Essais cliniques réalisés sur 15 patients; essais sur 100 patients prévus en 2007[26]	Injection d'anticorps dans la moelle épinière pour neutraliser les anticorps Nogo-A (inhibiteurs) après une blessure afin de favoriser la croissance du nerf	
Autres				
Bactérie *Streptococcus mutans* génétiquement modifiée pour prévenir la carie dentaire[27]	Université de la Floride (É.-U.)	Essais cliniques sur des porteurs de prothèses dentaires; sur le marché dans ~3-5 ans	Vaporisateur oral à utilisation unique pour prévenir la carie et les cavités dentaires	
Reconnaissance de la parole subvocale[28]	NASA (É.-U.)	Mise au point; prototype	Des électrodes fixés à la gorge reconnaissent les mouvements des muscles associés à la formation des mots plutôt que les sons; mis au point pour les astronautes, la communication sous-marine, le travail d'urgence dans un milieu bruyant	
Implantation d'une puce RFID [identification par radio-fréquence][29]	Verichip (É.-U.); les implants RFID sont approuvés par la FDA	Oui	Surveillance, identification, repérage des personnes (travailleurs, enfants, etc.)	
Implants magnétiques au bout des doigts[30]	Recherche indépendante par des *body- modders* (modificateurs du corps)	Oui	Amélioration du toucher	
Verres de lunettes qui doublent l'acuité visuelle 20/20[31]	PixelOptics (É.-U.)	Prototype ~février 2007	Le Département de la Défense des É.-U. a versé 3,5 millions $ à PixelOptics pour la mise au point d'applications militaires	
Implantation dans la racine dentaire d'une puce qui émet des ultrasons à pulsation de faible intensité (LIPUS)[32]	Université de l'Alberta (Canada)	Prototype; sur le marché ~milieu de 2008	Stimuler la racine pour favoriser la repousse de la dent	
Membre fonctionnel hybride (*HAL*) – exosquelette motorisé fixé aux jambes; un équipement dorsal contient un ordinateur avec connexion réseau sans fil, piles à la ceinture	Université deTsukuba/ Cyberdyne, Inc. (Japon)	Prototype; sur le marché en 2007?	Permet de marcher aux personnes ayant des troubles de la démarche	Pourrait être utilisé par les soldats, les équipes de secours en cas de désastre
Exosquelette des membres inférieurs Berkeley (*Bleex*)[34]	Berkeley Robotics and Human Engineering Lab (É.-U.)	Prototype; mise au point	Améliore la force et l'endurance des équipes de secours	Militaire : le projet Bleex est financé par la DARPA (É.-U.)

Sources : Dr Gregor Wolbring, Université de Calgary; ETC Group. Références page 55.

Le BANG –

La nano permet la convergence des technologies. Cela va-t-il mener à de meilleurs êtres humains?[63]

Les États et l'industrie du monde entier adoptent avec enthousiasme la version contemporaine de l'utopie issue de la convergence technologique – et ils la subventionnent grassement.

Certains d'entre nous utilisent déjà leur cellulaire pour prendre des photos, les envoyer à un ami et faire des recherches sur Google. Mais cet éthos du tout-en-un n'est pas limité aux technologies de l'information et des communications. Aux plus hauts niveaux, on parle depuis cinq ans de refondre la pratique des sciences et technologies grâce à la convergence permise par la nano. Le but ultime est d'intervenir sur tous les macrophénomènes – environnementaux, biologiques et sociétaux – par la maîtrise des phénomènes à l'échelle nanométrique.

La quête d'une *technologie fondamentale* permettant à l'être humain de dominer la nature n'a rien de nouveau. Francis Bacon l'évoquait déjà dans *La nouvelle Atlantide* en 1627,[64] décrivant l'utopie de l'île fantasmatique de Bensalem où, par exemple, « on maîtrise l'art de hâter ou reculer la saison normale des arbres ou des fleurs, qui peuvent pousser et fructifier plus rapidement… et celui d'obtenir des fruits plus gros et plus sucrés, et dans toute une variété de saveurs, d'arômes, de couleurs et de formes… et de faire pousser des plantes dans des mélanges de terreaux sans semences… et de changer une plante ou un arbre en un autre. »[65] Les mutations technologiques de la faune et de la flore de Bensalem ne sont pas aléatoires mais contrôlées (« Et cela n'est pas non plus l'effet du hasard, car nous savons à l'avance les matières et les mixtures qui vont engendrer une créature donnée »).[66] Dans des termes que reconnaîtront ceux qui ont lu les documents de la National Science Foundation (NSF) des É.-U., le but ultime de l'utopie est « de comprendre les causes… et repousser les limites de l'empire humain, afin d'aller au bout du possible. »[67] Voyons maintenant la vision utopique de la convergence technologique, telle que décrite par la NSF près de quatre siècles plus tard : « Nous voyons l'humanité reliée par un cerveau virtuel qui soude toutes les communautés de la Terre en vue de comprendre la nature sur le plan intellectuel et de la conquérir. »[68]

Les États et l'industrie du monde entier adoptent avec enthousiasme la version contemporaine de l'utopie issue de la convergence technologique – et ils la subventionnent grassement. Pour parler de convergence, les É.-U. utilisent très souvent le terme de NBIC (un acronyme tiré du nom des technologies concernées – nanotechnologies, biotechnologie, technologies de

Les **N**anotechnologies – qui contrôlent la matière par la manipulation des **A**tomes –

peuvent converger avec

La **B**iotechnologie – qui contrôle la vie par la manipulation des **G**ènes –

peuvent converger avec

Les technologies de l'**I**nformation – qui contrôlent les données par la manipulation des **B**its –

peuvent converger avec

Les neurosciences **C**ognitives – qui contrôlent l'esprit par la manipulation des **N**eurones.

l'information et sciences cognitives).[69] En Europe, on les appelle CTEKS (Converging Technologies for the European Knowledge Society – Technologies convergentes pour la société européenne du savoir). Au Canada, on utilise le terme de synthèse biosystémique.[70] Sans forcément partager l'enthousiasme et l'optimisme des États, la société civile a elle-même donné un nom à la convergence technologique : le BANG, un acronyme tiré des mots bits, atomes, neurones and gènes, les unités de base des technologies *NBIC*.[71]

Un exemple théorique de convergence est la mise au point et l'administration d'un médicament contre la maladie d'Alzheimer. Supposons qu'après avoir étudié des montagnes de données, on découvre qu'un composé naturel rare trouvé en Amazonie peut traiter efficacement certains troubles neurologiques. Par une technologie de recombinaison de l'ADN, des chercheurs réussissent à en produire une quantité importante. Un nanodispositif (découvert et produit grâce à la biotechnologie et aux technologies de l'information) permet d'acheminer le médicament aux neurones endommagés dans le cerveau. Les produits issus de la convergence ne vont pas forcément faire appel à toutes les technologies du BANG, mais la plupart utiliseront une ou plusieurs technologies issues des nanotechnologies, ou améliorées grâce à elles. La convergence permettrait ainsi d'implanter des nanomatériaux pour remplacer les os endommagés par l'arthrite, de programmer des neurones pour contrôler le curseur d'un ordinateur ou des implants cognitifs pour améliorer la faculté du cerveau d'emmagasiner de l'information et de l'utiliser.

Un rapport du projet pilote sur la prévision dans le domaine des sciences et technologies (parrainé par le Conseil national de recherche du Canada) a défini en 2003 cinq caractéristiques des technologies du BANG qui les rendent particulièrement corrélatives. Elles sont *convergentes* (non seulement elles se combinent les unes aux autres, mais elles s'appliquent dans divers secteurs industriels et champs de recherche), *fondamentales*, *réplicantes* (« chacune de ces technologies peut *s'autoreproduire* jusqu'à un certain point »),[72] *distribuées* (l'individu peut les utiliser) et *d'intérêt public* (dans le sens qu'elles « peuvent à la fois être très prometteuses et provoquer de grandes perturbations »).

Comme le gouvernement des É.-U. – puis l'Europe et le Canada – aborde le BANG sous l'angle de l'*amélioration des facultés humaines*, les débats sur les implications éthiques, économiques et sociales de l'amélioration et du prolongement de la vie sont d'une importance capitale.

« L'espérance de vie n'était que de 37 ans en 1800. La capacité de reprogrammer la biologie la fera bondir de façon spectaculaire, mais à un rythme beaucoup plus rapide. D'ici 15 ans, j'estime que l'espérance de vie s'allongera d'un an chaque année. Alors voici mon conseil : prenez soin de vous selon les bonnes vieilles méthodes pendant encore quelque temps, et vous aurez peut-être la chance de vivre jusqu'à la fin du siècle remarquable qui vient de commencer. »*

– Ray Kurzweil, « Reprogramming Biology », Scientific American, juillet 2006

* La façon dont Kurzweil s'occupe de sa santé n'a rien à voir avec les bonnes vieilles méthodes. Il prend 250 suppléments par jour, reçoit des injections thérapeutiques chaque semaine et fait analyser régulièrement des échantillons de sang, de cheveux et de salive pour vérifier les taux de nutriments, d'hormones et de sous-produits métaboliques dans son organisme.[73]

"…current government policies and company strategies including incentive and funding mechanisms, both in developed and developing countries, have not generated sufficient biomedical innovation relevant to the needs of most developing countries. New, and even existing, treatments remain unavailable and unaffordable to those who need them."

WHO Commission on Intellectual Property, Innovation and Public Health, April 2006

Comment la nanomédecine abordera-t-elle la maladie et la pauvreté dans le Sud mondialisé?

« Bientôt, dans un village isolé d'un pays en développement, un travailleur de la santé mettra une goutte de sang du patient sur un bout de plastique de la taille d'une pièce de monnaie. En quelques minutes, il obtiendra un diagnostic complet – la batterie de tests habituelle, plus le dépistage de maladies infectieuses comme la malaria et le VIH/sida, des déséquilibres hormonaux, et même du cancer. Cet incroyable petit bout de plastique est un laboratoire-sur-puce – l'un des produits et processus révolutionnaires issus de la recherche en nanotechnologie – et il peut transformer la vie de milliards de personnes parmi les plus vulnérables de la planète. » – Communiqué de presse, Université de Toronto, Joint Centre for Bioethics, 31 mars 2005[74]

En septembre 2000, les Nations unies ont adopté huit objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) et dix-huit cibles – une feuille de route en vue d'éradiquer la faim et la pauvreté et assurer la santé et la viabilité écologique, notamment pour les pauvres d'entre les pauvres, d'ici 2015. Trois OMD et huit cibles (sur dix-huit) sont liés à la santé. (Voir l'encadré 3.) L'équipe du Projet du Millénaire sur la science, la technologie et l'innovation considère les nanotechnologies comme un outil important pour atteindre les OMD.[75] Bien d'autres – chercheurs scientifiques, entrepreneurs, analystes de marchés et experts en développement rural, entre autres – croient aussi que les nanotechnologies peuvent améliorer la santé dans le monde, y compris le monde en développement.[76] Ils estiment que la nanotechnologie peut jouer un rôle important en santé dans le Sud mondialisé – directement, en traitant les malades avec des vaccins et nanothérapies d'avant-garde, mais aussi indirectement, en améliorant les conditions à l'origine des maladies, comme le manque d'eau potable. La recherche actuelle sur les nanofiltres et les nanoparticules capables d'éliminer les contaminants dans l'eau sont des exemples souvent cités de la façon dont les nanotechnologies peuvent contribuer à la santé dans les pays en développement. ETC Group admet que la RD nano sur l'eau peut profiter de façon importante au monde en développement. L'accès à l'eau potable ferait plus pour la santé dans le monde que n'importe quelle intervention médicale. La nanorecherche sur l'eau et son contexte politique et économique exigent une étude plus approfondie et ce secteur de la RD fera l'objet d'un rapport ultérieur d'ETC Group. L'analyse actuelle se limite à la nanomédecine – les médicaments et dispositifs de détection, de diagnostic et de traitement des maladies à l'échelle moléculaire.

ETC Group estime que la crise mondiale de la santé ne vient pas du manque d'innovation dans les sciences ou les technologies médicales, mais plutôt de la pauvreté et de l'inégalité. Les nouvelles technologies médicales n'ont aucune pertinence pour les pauvres si elles ne sont ni accessibles, ni abordables. L'innovation scientifique ne rime à rien si les personnes marginalisées n'ont pas accès aux technologies et aux traitements existants.

Médecins Sans Frontières note que les sociétés pharmaceutiques ont plus de talent pour déposer des brevets que

pour livrer des médicaments essentiels dans les pays en développement.[77] Comme le note la Commission de l'OMS sur la propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique dans son rapport d'avril 2006 :

Quelques faits :

- Le tiers de la population mondiale n'a pas un accès régulier aux **médicaments essentiels**. Dans certaines régions d'Afrique et d'Asie, c'est plus de la moitié de la population.[79]
- Il y a un *décalage fondamental* entre les besoins de l'être humain et l'innovation scientifique.[80] La grande majorité des médicaments commerciaux ne traitent pas les maladies tropicales. Seulement 1 % des médicaments apparus sur le marché entre 1974 et 2004 ont été mis au point avant tout pour des maladies tropicales ou la tuberculose.[81]
- Santé, pauvreté et environnement sont inextricablement liés. Selon l'OMS, les milieux malsains (manque d'eau potable, problèmes d'hygiène et autres facteurs liés à l'environnement) sont à l'origine de près du tiers des décès et des cas de maladie dans les pays en développement.[82] La diarrhée infectieuse tue 1,8 million de personnes par année – des enfants

Médecins Sans Frontières note que les sociétés pharmaceutiques ont plus de talent pour déposer des brevets que pour livrer des médicaments essentiels dans les pays en développement.[77]

Encadré 3 : Objectifs du Millénaire pour le développement en rapport avec la santé

Objectif 1. Réduire l'extrême pauvreté et la faim
(Cible 2) Réduire de moitié, entre 1990 et 2015, la proportion de la population qui souffre de la faim

Objectif 4. Réduire la mortalité des enfants
Cible 5) Réduire des deux tiers, entre 1990 et 2015, le taux de mortalité des enfants de moins de 5 ans

Objectif 5. Améliorer la santé maternelle
(Cible 6) Réduire des trois quarts, entre 1990 et 2015, le taux de mortalité maternelle

Objectif 6. Combattre le VIH/sida, le paludisme et d'autres maladies
(Cible 7) D'ici à 2015, avoir stoppé la propagation du VIH/sida et commencé à inverser la tendance actuelle
(Cible 8) D'ici à 2015, avoir maîtrisé le paludisme et d'autres maladies, et avoir commencé à inverser la tendance actuelle

Objectif 7. Assurer un environnement durable
(Cible 10) Réduire de moitié, d'ici à 2015, le pourcentage de la population qui n'a pas accès de façon durable à un approvisionnement en eau de boisson salubre
(Cible 11) Réussir, d'ici à 2020, à améliorer sensiblement la vie d'au moins 100 millions d'habitants de taudis

Objectif 8. Mettre en place un partenariat mondial pour le développement
(Cible 17) En coopération avec l'industrie pharmaceutique, rendre les médicaments essentiels disponibles et abordables dans les pays en développement

Adapté de http://www.who.int/mdg/goals/fr/

« Chaque année, plus de 14 millions de personnes meurent de maladies infectieuses que l'on peut soigner. Ils meurent parce que les médicaments coûtent trop cher, ne sont plus produits, sont de moins en moins efficaces, de plus en plus toxiques, ou parce qu'ils n'existent pas. »

Médecins Sans Frontières, « Neglected Diseases: Forgotten Lives », *ALERT*, printemps 2003

pour la plupart. 88 % du **fardeau mondial** des diarrhées infectieuses est imputable à des problèmes d'eau, d'assainissement et d'hygiène.[83]

- Le Sud mondialisé représente plus de 80 % de la population mondiale, mais seulement 10 % des ventes mondiales de médicaments. En 2005, l'Afrique représentait 1,1 % des parts du marché pharmaceutique mondial. (L'Amérique du Nord, l'Europe et le Japon représentaient 86 % du marché pharmaceutique mondial.)[84]

De nos jours, les systèmes de santé officiels dans le Sud mondialisé dépendent largement de l'innovation et des technologies médicales conçues d'abord en fonction des marchés de la santé des pays de l'OCDE. Dans ces pays, la RxD obéit avant tout à la quête de profit de l'industrie pharmaceutique plutôt qu'aux besoins des personnes ou au développement. 90 % de la RxD dans le monde porte sur des états qui touchent seulement 10 % de la population. Ainsi, la malaria constitue 3,1 % du **fardeau mondial des maladies**, alors qu'on lui consacre seulement 0,3 % (288 millions $) de la RxD. Si la malaria recevait sa juste part de la RxD, on lui consacrerait plus de 3,3 milliards $US par année – plus de 10 fois plus que le financement actuel.[85]

Mais il est fallacieux de prétendre que l'industrie pharmaceutique est un moteur de l'innovation pour la santé publique dans les pays de l'OCDE. Depuis quelques décennies, la capacité d'innovation de l'industrie pharmaceutique chute de manière radicale. Souvent, ce sont des laboratoires gouvernementaux ou universitaires qui mènent les recherches les plus novatrices, acquises ensuite par les grandes sociétés pharmaceutiques.[86] Aux É.-U., au moins le tiers des médicaments commercialisés par les grandes sociétés est couvert par des licences obtenues auprès d'universités ou de petites entreprises de biotech en démarrage.[87] Après des décennies de fusions et d'acquisitions, l'industrie pharmaceutique se concentre dans les mains d'une poignée de très grandes sociétés. En 2004, les 98 principales sociétés pharmaceutiques au monde totalisaient des ventes de 415 milliards $; les 10 sociétés les plus importantes détenaient près de 59 % du marché mondial.[88] Plutôt que de mettre au point de nouveaux composés, les sociétés apportent des modifications mineures aux médicaments existants et profitent des politiques publiques (suggérées par l'entreprise privée) les autorisant à prolonger la période de protection du brevet de médicaments rentables. Par exemple, des 78 médicaments approuvés par la Food & Drug Administration des É.-U. en 2002, seulement 17 contiennent de nouveaux ingrédients actifs et seulement 7 sont classés par la FDA comme une amélioration par rapport aux médicaments existants.[89] Les 71 autres médicaments sont des *produits d'imitation* – des variantes d'anciens médicaments ou des médicaments pas plus efficaces que les produits existants. Les sociétés freinent aussi la mise au point de médicaments génériques à meilleur prix – souvent en payant les fabricants pour qu'ils diffèrent la commercialisation de produits concurrents.[90]

Les sociétés pharmaceutiques ont l'habitude de justifier leurs prix exorbitants par les coûts élevés de la RD. De fait, elles dépensent beaucoup plus en *frais de marketing et d'administration* qu'en RD ou en coûts de fabrication. La chercheuse en santé Marcia Angell estime que les dépenses en marketing des géants pharmaceutiques ont été de 54 milliards $ en 2001 – soit 30 % des 179 milliards $ de revenus de l'industrie.[91] Cela comprend, entre autres, la publicité destinée aux consommateurs; les échantillons

gratuits remis aux médecins; le coût d'emploi des 88 000 agents commerciaux qui se rendent dans les bureaux des médecins; les cadeaux offerts aux médecins; la publicité dans des revues médicales; les activités de marketing et de promotion sous couvert de *formation professionnelle*.

« Dernièrement, j'ai été à deux rencontres importantes sur les nanotechnologies organisées par la Confederation of Indian Industry (CII) et l'Associated Chambers of Commerce and Industry of India (ASSOCHAM) ***et je ne comprends pas cet intérêt pour la collaboration avec d'autres pays que l'Inde… Pensez-vous que les sociétés étrangères sont prêtes à nous dévoiler leurs secrets de propriété intellectuelle? »*** [c'est nous qui soulignons] – A.N. Maitra, chimiste, Université de Delhi, Inde[92]

La dernière décennie a vu s'enfler la controverse sur le rôle des brevets de monopole exclusif qui rendent les médicaments inabordables pour les pauvres et les privent de médicaments d'importance vitale. En 1994, la création de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et son accord sur les Aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (ADPIC) ont forcé les pays en développement à adopter des brevets pharmaceutiques. À l'insistance des pays du Sud, la Déclaration de Doha relative à l'Accord sur les ADPIC, émise par l'OMC en 2001, réaffirme le droit des États de recourir à l'octroi obligatoire de licences pour faciliter l'accès à des médicaments moins coûteux par l'importation ou la production locale, tout en permettant aux pays les moins développés de ne pas accorder de brevets sur les produits pharmaceutiques et de ne pas les appliquer jusqu'à 2016.[93] Mais les mesures de protection de Doha ne se sont pas réalisées et elles s'effritent peu à peu, à mesure que les pays riches négocient des traités commerciaux bilatéraux qui imposent des lois sur les brevets encore plus contraignantes que les exigences de l'OMC, enlevant tout mordant à la Déclaration de Doha. Ainsi, le gouvernement des É.-U. défend avec vigueur les accords commerciaux bilatéraux et régionaux qui obligent les pays pauvres à reconnaître les *ADPIC-plus* – des dispositions visant à prolonger les monopoles de brevet des géants pharmaceutiques et à limiter le recours aux licences obligatoires et l'accès aux médicaments génériques moins chers.[94]

Des analystes de l'industrie notent que les nanomédicaments contribueront à l'obtention et à la prolongation des monopoles de brevets sur les composés médicamenteux existants. Selon l'un d'entre eux, « les nanosystèmes d'administration des médicaments se sont révélés une arme contre les médicaments génériques » parce que les nouvelles nanoformulations permettent au composé existant d'être qualifié de substance chimique nouvelle. « Cela peut avoir pour effet d'accroître la rentabilité, d'étendre le domaine de la propriété intellectuelle d'une société et de dissuader la concurrence pendant les années les plus rentables du médicament », selon NanoMarkets.[96] Dans ce scénario du statu quo, les innovations en nanomédecine vont sans doute accentuer le pouvoir de l'industrie pharmaceutique sans changer grand-chose aux problèmes de santé et de pauvreté des collectivités marginalisées.

Pour les faire accepter, les sociétés pharmaceutiques vantent le côté *thérapeutique* de leurs coûteux AFH d'avant-garde pour les pauvres des pays en développement. Le scénario le plus probable, c'est que l'amélioration des facultés humaines augmentera les inégalités entre le Nord et le Sud, et entre riches et pauvres, tant dans les pays du Nord que dans ceux du Sud. (Voir pp. 14-21)

La dernière décennie a vu s'enfler la controverse sur le rôle des brevets de monopole exclusif qui rendent les médicaments inabordables pour les pauvres et les privent de médicaments d'importance vitale

Les mesures de protection de Doha ne se sont pas réalisées et elles s'effritent peu à peu, à mesure que les pays riches négocient des traités commerciaux bilatéraux qui imposent des lois sur les brevets encore plus contraignantes que les exigences de l'OMC.

L'arrivée des nanomédicaments coïncide avec la délocalisation accélérée des essais cliniques de médicaments dans les pays du Sud mondialisé.[97]

« En empêchant les pays d'utiliser les médicaments génériques, vous bloquez en pratique l'accès aux médicaments. Vous êtes en train de soutenir un génocide, parce que vous êtes en train de tuer des gens. »

– Pedro Chequer, dirigeant du programme national de lutte contre le sida au Brésil[95]

L'arrivée des nanomédicaments coïncide avec la délocalisation accélérée des essais cliniques de médicaments dans les pays du Sud mondialisé.[97] Ironie du sort, des millions de patients dans les pays en développement auront enfin accès aux médicaments des géants pharmaceutiques – en tant que cobayes pour les nouveaux traitements au stade expérimental. D'ici 2010, on estime que deux millions de personnes vont participer aux essais cliniques en Inde – pour la grande majorité, des gens pauvres et illettrés.[98] En 2005, le gouvernement indien a cessé d'exiger que l'on atteste l'innocuité des médicaments lors d'essais réalisés dans leur pays d'origine avant de les tester sur des Indiens.[99] *NanoBiotech News* constate que certaines sociétés en nanobiotechnologie mènent les premiers stades des essais cliniques ailleurs qu'aux É.-U. et en Europe parce qu'il y a moins d'obstacles réglementaires.[100] Si la tendance se maintient, le Sud mondialisé pourrait devenir le terrain d'essai initial des médicaments et dispositifs nanos.

Médicaments essentiels

Selon la définition de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les médicaments essentiels comme ceux qui comblent les besoins de santé prioritaires de la population.[101] En 1975, l'Assemblée mondiale de la santé a demandé à l'OMS d'aider les États membres à dresser une liste des médicaments essentiels et à se les procurer, en s'assurant de leur sûreté, leur qualité et leur rapport coût-efficacité. La première liste de médicaments essentiels (LME) de l'OMS, publiée en 1977, a fait figure de « révolution tranquille dans le monde de la santé publique internationale ».[102] On y établit le principe que certains médicaments sont plus utiles que d'autres – et que plusieurs médicaments essentiels sont souvent inaccessibles pour les gens qui en ont besoin. De nos jours, la plupart des pays maintiennent une liste nationale des médicaments essentiels. Cette liste est importante parce qu'elle oriente les efforts du secteur public en vue d'obtenir et de fournir des médicaments, ainsi que les programmes de remboursement du coût des médicaments, les dons de médicaments et la production locale des médicaments.

Cela fait 29 ans que des ONG, des organismes humanitaires sans but lucratif et des appareils gouvernementaux adoptent des politiques relatives aux médicaments essentiels. Mais l'industrie pharmaceutique a toujours refusé la notion de LME, sous prétexte que c'est une ingérence dans l'expression des forces du marché et que cela menace les activités du secteur privé.

En principe, « Les médicaments essentiels sont censés être disponibles à tout moment dans le cadre de systèmes de santé fonctionnels, en quantité suffisante, sous une forme appropriée, avec une qualité assurée, accompagnés d'une information adéquate et à un prix accessible pour les individus et les communautés. »[103] Bien sûr, il en va tout autrement dans la réalité. Il y a une grave inégalité dans l'accès aux médicaments essentiels, même quand l'*accès* est défini de façon très raisonnable – selon l'OMS, l'accès est le pourcentage de la population capable d'obtenir au moins 20 médicaments essentiels, disponibles et abordables à tout moment dans un établissement sanitaire ou un point de vente de médicaments, *dans un rayon d'une heure de marche du lieu de résidence du patient*.[104]

En 1988, l'OMS a publié un rapport sur la situation des médicaments dans le monde (*The World Drug Situation)*, qui estimait que 1,3 à 2,5 milliards de personnes n'avaient pas ou peu d'accès régulier à la plupart des médicaments

essentiels. Quand l'OMS a publié son rapport de suivi (*The World Medicines Situation*) 16 ans plus tard, ce chiffre n'avait pratiquement pas bougé, même s'il représentait une moindre proportion de la population mondiale – 30 %, par rapport à 37 %.[105] Dans quatre des six régions de l'OMS (totalisant 183 pays), il y a plus de pays ayant un accès très faible à moyen (<50-80 %) que moyen à très élevé (81->95 %) aux médicaments essentiels. Ainsi, des 35 pays de la région des Amériques, 21 ont un accès très faible à moyen; 14 ont un accès moyen à très élevé.

Le tableau suivant compare l'accès aux médicaments essentiels (ME) en Afrique au moment du premier rapport mondial sur les médicaments en 1988 et lors du rapport de suivi en 2004. Selon l'OMS, 47 % de la population africaine est privée d'accès aux médicaments essentiels. Des 45 pays, 16 ne démontrent aucun changement en mieux ou en pire dans l'accès aux ME entre le milieu des années 1980 et la fin des années 1990; tous sauf un de ces 16 pays ont un accès très faible aux ME.

Il y a une grave inégalité dans l'accès aux médicaments essentiels, même quand l'accès est défini de façon très raisonnable.

« C'est du matériel à livrer… mais j'ai besoin de place pour les nanomédicaments. Par chance, il faut juste une toute petite place! »

Tableau 3 : Proportion de la population des pays africains ayant un accès régulier aux médicaments essentiels

	World Drug Situation, 1988 (données de 1986-1987)	*World Medicines Situation*, 2004 (données de 1999)	Aucun changement, diminution ou accès très faible (<50 %)
Algérie	60-90 %	>95 %	
Angola	<30 %	<50 %	√
Bénin	<30 %	50-80 %	
Botswana	60-90 %	81-95 %	
Burkina Faso	30-60 %	50-80 %	
Burundi	30-60 %	<50 %	√
Cameroun	<30 %	50-80 %	
Comores	60-90 %	81-95 %	
Congo	30-60 %	50-80 %	
Côte d'Ivoire	<30 %	50-80 %	
Djibouti	60-90 %	50-80 %	
Égypte	60-90 %	81-95 %	
Érythrée	n.a.	50-80 %	
Éthiopie	30-60 %	50-80 %	
Gabon	60-90 %	<50 %	√
Gambie	60-90 %	81-95 %	
Ghana	30-60 %	<50 %	√
Guinée	<30 %	81-95 %	
Guinée équatoriale	<30 %	<50 %	√
Guinée-Bissau	30-60 %	<50 %	√
Jamahiriya arabe libyenne	60-90 %	>95 %	
Kenya	60-90 %	<50 %	√
Lesotho	60-90 %	50-80 %	√
Liberia	<30 %	<50 %	√
Malawi	30-60 %	<50 %	√
Mali	<30 %	50-80 %	
Maroc	30-60 %	50-80 %	
Maurice	60-90 %	>95 %	
Mauritanie	<30 %	50-80 %	
Mozambique	30-60 %	50-80 %	
Niger	30-60 %	50-80 %	
Nigéria	<30 %	<50 %	√
Ouganda	30-60 %	50-80 %	
République-centrafricaine	<30 %	50-80 %	
République démocratique du Congo	Sans objet	Sans objet	
Rwanda	<30 %	<50 %	√
Sénégal	<30 %	50-80 %	
Sierra Leone	30-60 %	<50 %	√
Somalie	<30 %	<50 %	√
Soudan	<30 %	<50 %	√
Tchad	<30 %	<50 %	√
Togo	30-60 %	50-80 %	
Tunisie	30-60 %	50-80 %	
Zambia	30-60%	50-80%	
Zimbabwe	30-60%	50-80%	

Une nano favorable aux pauvres?

On cite souvent deux produits en cours de conception pour démontrer que les nanotechnologies peuvent régler des problèmes de santé majeurs dans les pays en développement : 1) un microbe artificiel qui synthétise l'**artémisinine,** un antipaludique puissant; 2) un microbicide vaginal à base de nanomolécules conçu pour protéger les femmes du VIH/sida et des maladies transmissibles sexuellement. Nous les présentons ici.

Un antipaludique grâce à la nano-ingénierie

La **biologie synthétique**, une convergence de la biotechnologie et de l'ingénierie pour fabriquer en laboratoire des systèmes biologiques en vue de tâches données, doit son renom à la fabrication de microbes destinés à produire un antipaludique bon marché. La malaria afflige 300 à 500 millions de personnes et en tue plus d'un million par année (58 % des cas de malaria frappent le cinquième le plus pauvre de la population mondiale – surtout des jeunes enfants en Afrique).[106]

Grâce à l'appui de la Fondation Bill et Melinda Gates, Jay Keasling, professeur de génie chimique à l'Université de Californie-Berkeley et directeur du Center for Synthetic Biology, a créé une bio-usine chimique pour fabriquer de l'artémisinine – un antipaludique puissant.

L'artémisinine, un produit naturel extrait des feuilles d'une armoise odorante, l'*Artemisia annua*, a traité avec succès toutes les souches connues de malaria. Les Chinois utilisent l'armoise comme plante médicinale depuis plus de 2000 ans. Il y a actuellement pénurie d'artémisinine de source naturelle, même si des experts estiment qu'il est techniquement possible d'en cultiver assez pour traiter tous les patients atteints de malaria dans le monde.[107] La synthèse chimique du médicament est longue et coûteuse.[108] En 2004, la Fondation Bill et Melinda Gates a versé une subvention de 43 millions $ sur cinq ans conjointement au laboratoire de Keasling à Berkeley et à sa jeune entreprise Amyris, ainsi qu'à l'Institute for OneWorld Health – un organisme sans but lucratif – pour mettre au point un dérivé microbien d'artémisinine. Le laboratoire de Keasling fabrique les voies métaboliques d'une levure synthétique (*Saccharomyces cerevisiae)* en vue d'obtenir les substances intermédiaires requises pour produire l'artémisinine.[109] Le laboratoire produit déjà de l'acide artémisinique – l'étape qui précède la production de l'artémisinine proprement dite. Selon Keasling, la prochaine étape exige une composition chimique et le produit fini n'est pas pour demain – on mettra peut-être dix ans à extraire assez d'acide artémisinique pour régler le problème de la malaria dans le monde.[110] S'il faut dix ans de plus aux chercheurs pour réussir, quel sera le coût de production final de l'artémisinine par biologie synthétique?

Si des microbes synthétiques peuvent produire un traitement efficace contre la malaria, sera-t-il accessible et abordable? UC Berkeley a accordé à Amyris et OneWorld Health une licence sans redevances pour mettre au point le traitement antipaludique. Keasling dit qu'Amyris produira le médicament au prix coûtant et que la société pharmaceutique sans but lucratif OneWorld Health se chargera des obstacles administratifs. Amyris compte utiliser la même plateforme technologique pour produire d'autres médicaments beaucoup plus payants.

La biologie synthétique, une convergence de la biotechnologie et de l'ingénierie pour fabriquer en laboratoire des systèmes biologiques en vue de tâches données.

Si des microbes synthétiques peuvent produire un traitement efficace contre la malaria, sera-t-il accessible et abordable?

Il existe déjà une technologie simple et bon marché (les condoms), plus facile à distribuer et à entreposer – mais il n'y a pas assez de condoms. Ainsi, en 2003, l'aide versée par les donateurs équivalait à un condom par année pour chaque homme en âge de se reproduire dans les pays en développement.[118]

Selon le site Web de l'entreprise, « L'équipe de scientifiques et d'ingénieurs d'Amyris s'apprête à commercialiser des produits pharmaceutiques et autres produits chimiques de grande valeur, issus des forêts et des mers du monde entier, en fabriquant ces composés à partir de microbes synthétiques. »[111]

Néanmoins, les chercheurs pourraient s'enliser dans un réseau complexe de revendications sur la propriété intellectuelle des processus et produits liés à la production d'artémisinine. Il leur faudrait alors négocier des redevances et payer des frais de licence à plusieurs détenteurs de brevets. Rappelons à ce sujet le cas du célèbre *Golden Rice* enrichi de vitamine A, mis au point pour combler les carences nutritives des populations pauvres dans les pays du Sud. Financés par des fonds publics, les chercheurs ont dû affronter quelque 70 revendications de brevets. Excédés, ils ont fini par céder le projet *Golden Rice* au géant de l'agrochimie AstraZeneca (maintenant Syngenta) en 2000. Le fameux *Golden Rice* n'est toujours pas commercialisé.

VivaGel – Atomiser les microbicides

Les microbicides englobent une série de composés en cours de mise au point qui visent à réduire ou prévenir la transmission du VIH et d'autres maladies transmissibles sexuellement par application topique. Le VIH infecte plus de 7000 femmes chaque jour dans le monde. Des personnes qui militent pour la santé des femmes appuient la mise au point des microbicides parce que cela doterait les femmes d'une protection sûre, abordable et accessible.[112] Les microbicides ne sont pas encore sur le marché, mais près d'une vingtaine sont au stade des essais cliniques.

L'un des microbicides vaginaux testés sur l'être humain, le *VivaGel* de Starpharma, est à base de nanomolécules, les **dendrimères** – des molécules synthétiques tridimensionnelles fortement ramifiées. L'ingrédient actif du VivaGel fait office de velcro moléculaire – il inactive les virus du VIH et de l'herpès génital en se liant aux récepteurs à la surface du virus, ce qui l'empêche de s'unir aux cellules-hôtes qu'il essaie d'infecter.[113]

VivaGel est mis au point à titre de microbicide topique capable de prévenir la transmission du VIH et d'autres maladies transmissibles sexuellement (MTS) une fois appliqué dans le vagin avant le rapport sexuel. Dans les études sur des animaux, le principal ingrédient de VivaGel a aussi exercé un effet contraceptif.[114] Si Vivagel peut prévenir les MTS et les grossesses, les analystes du marché considèrent qu'il pourra gruger le marché du condom.[115] VivaGel est le premier dendrimère soumis au processus de la FDA et on le teste auprès de diverses populations dans le monde.[116]

En 2005, les National Institutes of Health (NIH) des É.-U. ont accordé à Starpharma (établi à Melbourne, en Australie) 20,3 millions $US pour soutenir la mise au point de VivaGel en vue de prévenir le VIH.

En avril 2006, les NIH des É.-U. ont annoncé qu'ils financeraient un essai clinique pour tester l'utilisation de VivaGel en vue de prévenir l'herpès génital.

Au bout du compte, les microbicides vaginaux seront-ils sûrs, abordables et accessibles pour les personnes qui en ont le plus besoin? (Les travailleuses du sexe du Nigéria se badigeonnent le vagin de jus de lime pour se protéger du VIH – pourront-elles bientôt obtenir une protection à la fine pointe de la science?[117]) Des personnes qui militent pour la santé des femmes font remarquer qu'il existe déjà une technologie simple et bon marché (les condoms), plus facile à distribuer et

à entreposer – mais il n'y a pas assez de condoms. Ainsi, en 2003, l'aide versée par les donateurs équivalait à un condom par année pour chaque homme en âge de se reproduire dans les pays en développement.[118]

Selon Eldis (Institute of Development Studies, Essex), la mise au point d'un microbicide réplicable, d'une bonne durée de conservation et d'utilisation facile suppose des investissements d'environ 600 millions $US au cours de dix prochaines années.[119] En théorie, les microbicides permettront aux femmes de mieux se protéger contre le VIH sans avoir besoin d'obtenir la coopération du partenaire. Mais c'est l'inégalité entre les sexes qui est à l'origine du problème et tant que cette question n'est pas réglée, aucune nouvelle technologie ne peut offrir de solution simple. Des

Encadré 4 : Aborder la santé mondiale sous l'angle du *Grand défi* : est-ce que ça fonctionne?

Selon *Science*, on a consacré au cours des sept dernières années plus de 35 milliards $ à lutter contre des maladies qui touchent démesurément les pauvres.[10] Une grosse partie de ces fonds a été versée par des personnes démesurément riches. Depuis 1999, l'homme le plus riche au monde, Bill Gates – par le truchement de la Fondation Bill et Melinda Gates – a donné 6 milliards $, à peu près l'équivalent du budget des programmes de l'OMS pour la même période.[11] En juin 2006, le richissime investisseur Warren Buffet (qui serait le deuxième plus riche au monde) a annoncé son intention de verser environ 31 milliards $ de ses 44 milliards $ à la Fondation Gates – un don qui doublerait les avoirs de l'organisme caritatif.[12] Selon *The Economist*, c'est la création rapide de richesse – le monde compte aujourd'hui 691 milliardaires par rapport à 432 il y a dix ans – et la distribution inégale de la richesse qui expliquent une telle manne philanthropique.[13]

Les riches donateurs s'alignent souvent sur des supercampagnes mondiales réunissant États, entreprises privées et fondations dans des partenariats public-privé (PPP). Les objectifs sont aussi ambitieux que l'ampleur de la participation – *Abolissons la pauvreté* ou *Faire reculer le paludisme*, par exemple. On croit que les PPP permettent d'accomplir ce que le P-pour-public est incapable de faire et ce que le P-pour-privé n'est pas motivé à faire. Il y a dix ans, il n'y avait aucun PPP voué à la mise au point de ***médicaments orphelins*** – des médicaments pour traiter les maladies offrant des perspectives de profit nulles ou minimes. De nos jours, on compte plus de 63 projets visant à mettre au point des médicaments pour des maladies répandues dans le Sud mondialisé.[14] La vente de médicaments orphelins n'offre pas plus de perspectives de profits, mais les fondations philanthropiques bien nanties et, dans une moindre mesure, les États, ont proposé aux sociétés pharmaceutiques un marché impossible à refuser : les fondations et les États fournissent les fonds et les sociétés fournissent le savoir-faire en matière de mise au point des médicaments et l'infrastructure requise pour les essais cliniques. Selon *Science*, les géants de l'industrie pharmaceutique trouvent amplement leur compte dans ce modèle sans pertes ni profits – ils rehaussent leur image de marque auprès de la population et peuvent accéder dans les pays en développement à des marchés et des chercheurs qui pourront leur être utiles ailleurs. »[15]

« Tout le monde s'entend sur une vérité maintes fois éprouvée dans la lutte contre les maladies infectieuses dans le monde : c'est plus facile à dire qu'à faire!… Manifestement, la révolution actuelle dans le travail en santé mondiale a apporté plus d'argent, plus d'outils, plus d'idées créatrices et plus de pertinence politique que jamais. Mais nous sommes encore très loin de l'objectif : réduire l'écart entre l'intention et l'action. »

– Jon Cohen, « The New World of Global Health », *Science*, 13 janvier 2006

La mise au point d'un microbicide réplicable, d'une bonne durée de conservation et d'utilisation facile suppose des investissements d'environ 600 millions $US au cours de dix prochaines années.[119]

personnes qui militent pour la santé des femmes estiment qu'il vaudrait mieux consacrer ces fonds à des programmes d'autonomisation des femmes pour leur donner les moyens d'augmenter leurs revenus et de prendre la maîtrise de leur vie. La mise au point des microbicides soulève aussi plusieurs questions en matière de santé et de sécurité, notamment dans le Sud mondialisé où les mauvaises conditions de vie peuvent compromettre la sûreté et l'efficacité de son utilisation. Si on se fie à l'expérience passée, on peut craindre que les pressions politiques en vue d'approuver des microbicides efficaces desservent la rigueur des tests et que des groupes de femmes vulnérables servent de cobayes (les essais cliniques d'un microbicide [pas celui de Starpharma] testé sur des travailleuses du sexe ont ainsi augmenté le taux d'infections au VIH chez ces femmes).[120]

VivalGel est une technologie exclusive et la stratégie d'affaires annoncée par Starpharma consiste à « créer une plus-value à partir de la nanotechnologie des dendrimères en utilisant sa PI tout au long de la mise au point du produit, la concession de licence et la création de partenariats. »[121] Starpharma détient les droits de trois brevets étatsuniens de vaste portée sur l'usage pharmaceutique des dendrimères. La société possède également 33 % des parts de Dendritic NanoTechnologies, Inc. (DNT), qui détient plus de brevets que toute autre firme sur la technologie des dendrimères. (Dow Chemical Co. détient aussi 33 % des parts de DNT.)

Le tableau ci-contre présente sept projets en santé mondiale – tous des PPP. Les statistiques relatives à l'incidence des maladies dans le Sud mondialisé sont consternantes : l'espérance de vie moyenne *a baissé* dans 38 pays depuis 1999, surtout à cause de la transmission du VIH;[122] 2 millions d'enfants meurent chaque année de maladies à prévention vaccinale;[123] un enfant meurt de la malaria toutes les 30 secondes en Afrique subsaharienne;[124] plus de 8 millions de personnes contractent la tuberculose infectieuse chaque année.[125] Il serait pourtant injuste d'en conclure que tous les programmes sont des échecs purs et simples, vu l'ampleur colossale des défis à relever et le caractère relativement récent des projets – un seul a plus de dix ans et cinq ont été créés il y a moins de cinq ans. (La seule exception serait le programme Faire reculer le paludisme, qualifié par le *British Medical Journal* de « projet défaillant » en 2004 parce qu'il n'a pas réussi à doter les collectivités les plus pauvres d'outils contre la malaria – moustiquaires, insecticides, médicaments à base d'artémisinine.[126])

Il serait aussi fallacieux d'affirmer que l'un ou l'autre de ces programmes est un succès sur toute la ligne. Tous comportent des failles et certains ont connu plus de problèmes que d'autres. En juin 2006, le *New York Times* a braqué les projecteurs sur certains échecs de la lutte contre la malaria : le Fonds mondial n'a pas encore livré un seul des 1,8 million de moustiquaires promis à l'Ouganda en 2004; la Banque mondiale n'a chargé aucun de ses employés du dossier de la malaria, après s'être engagée en 2000 à réduire la malaria de moitié en Afrique; un maigre 8 % du budget 2004 de la US Agency for International Development (USAID) consacré à la malaria est allé à l'achat de médicaments, moustiquaires et insecticides – la plus grande partie a été engloutie en frais d'experts-conseils et en réunions.[127] On reproche bien des choses aux projets de santé à grand déploiement : mauvaise gestion (ou carrément corruption), dédoublement des tâches, manque d'efficacité, absence de vision à long terme et absence d'une *architecture* mondiale capable d'agencer les efforts.[128] Malgré l'enthousiasme

croissant devant les possibilités offertes par la nanomédecine pour relever certains des plus grands défis de la planète, il est important d'insister sur le fait qu'aucune innovation ne peut à elle seule faire disparaître ces problèmes structurels.

Tableau 4 : Projets actuels en santé mondiale

Initiative	Focus	Year Launched	Donors	Pledged, Committed or Spent Funds, $
Grand Challenges in Global Health Initiative[1]	Applying science & technology to health problems of developing world	2003	Gates Foundation, Wellcome Trust, the Canadian Institutes of Health Research and the Foundation for the National Institutes of Health (US)	481.6 million
Global Fund to Fight AIDS, Tuberculosis and Malaria	Financing treatment and prevention	2002	Governments, Gates Foundation, Hewlett Foundation, UN Foundation, Novartis, Statoil and others	8.6 billion
Global Alliance for Vaccines and Immunization (GAVI)	Financing and developing of childhood vaccines	1999	WHO, UNICEF, World Bank, NGOs, Gates Foundation, governments, vaccine industry (Wyeth, Chiron, Berna, GSK, Merck, Sanofi) and others	3 billion
Various PPPs for Drug, Vaccine, Diagnostic, Microbicide Development	Developing treatments, vaccines, diagnostics	n/a	Various governments, foundations, philanthropists, corporations	1.2 billion
Multi-Country HIV/ AIDS Program	Financing scale-up of existing gov't and community prevention and treatment efforts	2000	World Bank	1.1 billion
International AIDS Vaccine Initiative	AIDS vaccine R & D	1996	World Bank/Global Forum for Health Research governments, Becton, Dickinson and Co., Gates Foundation, Continental Airlines, Deutsche AIDS-Stiftung, DHL, Google, Otto Haas Charitable Trust #2, Pfizer, Rockefeller Foundation, Until There's a Cure Foundation and others	>100 million
Roll Back Malaria Partnership	Treatment and prevention	1998	Governments, World Bank, UN agencies, academic institutes, NGOs, corporations, individuals	~150 million[2]

Sources: *Science* 13 January 2006, p. 163; ETC Group

« La promesse des nanotechnologies dans l'imagerie du cancer, c'est la quasi-certitude d'une détection beaucoup plus sensible et plus précise du cancer à un stade précoce… Ce travail va brouiller les frontières actuelles entre détection et thérapie. »

– Adrian Lee, professeur en médecine, Baylor College of Medicine[130]

L'un de secteurs les plus médiatisés de la recherche nanomédicale est l'utilisation de nanobilles d'or pour la détection et le traitement des tumeurs cancéreuses.

Applications de la nanomédecine

(administration des médicaments, thérapie, imagerie et diagnostic)

Les nanotechnologies peuvent avoir une multitude d'applications dans le domaine médical. Cette section en présente quelques-unes, dans les domaines les plus représentatifs sur le plan de la Rxd ou des produits commerciaux : administration ciblée des médicaments, thérapies, imagerie et diagnostic nanos. Plutôt que de dresser une liste d'épicerie de toutes les applications possibles (il y en a des centaines), nous avons choisi d'en illustrer quelques-unes dans chacun des domaines. Il faut noter que l'administration des médicaments, l'imagerie et le diagnostic ne sont pas toujours des secteurs distincts. Par exemple, dans la recherche sur le cancer, on veut mettre au point des nanodispositifs multifonctionnels utilisés à la fois pour l'imagerie et la thérapie anticancéreuses.[129]

1. Administration ciblée des médicaments

Nanobilles d'or : L'un de secteurs les plus médiatisés de la recherche nanomédicale est l'utilisation de nanobilles d'or pour la détection et le traitement des tumeurs cancéreuses. Il illustre bien le chevauchement entre détection et thérapie : les nanobilles sont à la fois agents d'imagerie et agents thérapeutiques. Le concept de nanobilles remonte au début des années 1950, mais elles ont été créées des décennies plus tard, quand il est devenu possible de fabriquer des particules à l'échelle nano.[131] Naomi Halas, de l'Université Rice (Houston, É.-U.) a mis au point des nanobilles d'or dans les années 1990. Avec sa collègue Jennifer West, elle aussi de Rice, elle a mis sur pied une jeune entreprise, Nanospectra Biosciences, Inc. en 2002. Depuis, l'entreprise a reçu des subventions de plus de 5 millions $ (dont plus de 3 millions $ du gouvernement fédéral) pour mettre au point des utilisations médicales des nanobilles d'or.[132] On prévoit obtenir les résultats d'essais cliniques sur l'être humain au début 2007.[133]

Les nanobilles de Halas sont des particules de silice (du verre) complètement recouvertes d'or, formées de quelques millions d'atomes. On peut les produire dans toutes les tailles, d'un diamètre inférieur à 100 nm jusqu'à plusieurs centaines de nm. La fabrication des nanobilles exige des techniques de nano-ingénierie pour régler au nanomètre près l'épaisseur de la couche d'or en vue d'obtenir les propriétés optiques recherchées. Une fois injectées dans la circulation sanguine, les nanobilles se dirigent d'elles-mêmes vers le site de la tumeur, sans ciblage supplémentaire. Pour se nourrir et grossir, les tumeurs donnent très vite naissance à infinité de vaisseaux sanguins – plusieurs sont défectueux et les nanobilles s'infiltrent dans ces *failles* vasculaires pour parvenir jusqu'à la tumeur. La détection et le ciblage des tumeurs par l'exploitation des failles vasculaires porte le nom d'effet EPR (*enhanced permeability and retention* – accroissement de la perméabilité et de la rétention).

Halas explique que la nanobille est « essentiellement une nanolentille » qui capte la lumière et la focalise autour d'elle.[134] En contrôlant la taille des nanobilles – à la fois celle du noyau de silice et l'épaisseur de la couche d'or – on peut modifier la façon dont elles absorbent la lumière. Pour la détection et le traitement du cancer, on cherche à régler les nanobilles pour les

faire réagir aux proches infrarouges (NIR).[135] Quand on les expose aux NIR, les nanobilles agissent comme une nuée de lucioles en illuminant la zone où elles se sont rassemblées (soit le site de la tumeur). Une fois terminé leur travail d'imagerie, elles se transforment en agents thérapeutiques. On dirige un laser NIR sur le site de la tumeur à l'extérieur du corps (la lumière peut traverser les tissus sur plus de 10 cm) et les nanobilles absorbent la lumière pour la focaliser sur la tumeur. La zone entourant les nanobilles se réchauffe et fait *cuire* la tumeur jusqu'à son ablation (sa destruction). C'est un peu comme la fameuse expérience scientifique de notre enfance : la nanobille fait office de loupe et le laser représente le soleil qui chauffe le brin d'herbe – la tumeur.

En 2005, Halas rapporte les résultats incroyables du traitement anticancéreux par nanobilles chez les souris :

« Une fois [les nanobilles] en place, on émet le rayon infrarouge à travers la peau jusqu'au site de la tumeur. Il faut seulement trois minutes avec un laser à main très simple… Dans les études sur les souris, nous avons observé la rémission complète de toutes les tumeurs en dix jours. Dans les deux groupes contrôle de souris, les tumeurs ont continué à grossir de façon très importante jusqu'au décès. Mais les souris traitées avec les nanobilles ont toutes survécu… le taux de survie a été de 100 % et elles vivent encore. Le test a été réalisé en 2003 – il y a presque deux ans. Il semble donc que la plupart de ces souris vont mourir de leur belle mort. »[136]

Halas fait remarquer que les nanobilles ne laissent aucune « trace toxique » dans l'organisme, contrairement aux agents chimiothérapeutiques courants. Sur le site Web de Nanospectra, on dit que « des études à long terme n'ont démontré aucune toxicité ni aucun effet sur le système immunitaire. »[137] Il faudra vérifier ces allégations de près, puisque les nanobilles vont sans doute rester dans l'organisme à demeure – on ne sait pas clairement de quelle façon (ou si) le corps peut les évacuer.

2. Nanoparticules thérapeutiques

Nanopanacée? Les produits médicaux contenant des nanoparticules d'argent comptent parmi les premiers succès commerciaux des nanotechnologies. Les propriétés antimicrobiennes de l'argent sont connues depuis des millénaires, mais la surface accrue des nanoparticules synthétiques d'argent (1-100 nm) accroît la réactivité chimique et améliore les propriétés thérapeutiques.

Nucryst Pharmaceuticals (une filiale de Westaim Corporation) fabrique des pansements enduits de nanoargent pour combattre l'infection et l'inflammation en cas de blessure et de brûlure. L'argent détruit les bactéries et les virus en empêchant la migration des électrons dans les microbes et en affaiblissant la réplication des cellules quand il entre en contact avec l'ADN. Les ions d'argent (des atomes ayant une charge électrique en raison d'un changement du nombre d'électrons) perturbent aussi les structures et fonctions microbiennes.[138] Mais ils ne sont pas sans danger : si on libère un niveau élevé d'ions d'argent pendant une période prolongée, on risque de tuer aussi les cellules – il faut donc contrôler l'exposition avec le plus grand soin.[139]

Smith & Nephew, l'une des plus grandes sociétés d'équipement médical au monde, vend les pansements enduits d'argent de Nucryst dans 30 pays sous le nom d'*Acticoat*. La demande de pansements antimicrobiens augmente en raison de la résistance croissante des bactéries aux antibiotiques. Smith & Nephew affirme qu'Acticoat combat

Les produits médicaux contenant des nanoparticules d'argent comptent parmi les premiers succès commerciaux des nanotechnologies.

Des spécialistes municipaux du traitement des eaux se demandent si ces nanoparticules d'argent ne risquent pas de causer de graves problèmes une fois déversées dans les eaux usées – en tuant le plancton, elles perturberaient la chaîne alimentaire.[144]

L'avantage potentiel des points quantiques dans l'imagerie du corps humain est leur sensibilité extrême à la détection – il est possible de détecter une protéine distincte marquée d'un point quantique dans une cellule vivante.

150 agents pathogènes, dont certains micro-organismes résistants.[140]

Johnson & Johnson, Bristol-Myers Squibb et Medline Industries font partie des sociétés qui commercialisent des produits médicaux à base de nanoparticules d'argent. Mais les pansements ne sont qu'un début. Depuis que les infections bactériennes nosocomiales seraient la cinquième cause de décès aux É.-U., l'industrie étudie la possibilité d'utiliser les nanoparticules d'argent comme enduit sur les instruments chirurgicaux, les draps et les lits d'hôpital.[141] En décembre 2005, la Food & Drug Administration des É-U. a approuvé un cathéter (tube qui transporte les liquides) enduit d'argent antimicrobien pour implantation dans le corps humain.[142]

On utilise aussi les enduits de nanoargent comme agents antimocrobiens sur des produits courants – paroi intérieure des réfrigérateurs, balais, récipients pour conserver les aliments et vêtements. Les chaussettes antimicrobiennes *SmartSilver* sont vendues dans les dépôts militaires de l'armée américaine et les chercheurs développent des enduits de nanoparticules d'argent aux propriétés « autonettoyantes ».[143] Une nouvelle lessiveuse offerte par Samsung (*SilverCare*) injecte des ions d'argent dans l'eau de lavage et de rinçage. Samsung affirme que les ions d'argent pénètrent les tissus pour détruire les bactéries sans eau chaude ni javellisant. Des spécialistes municipaux du traitement des eaux se demandent si ces nanoparticules d'argent ne risquent pas de causer de graves problèmes une fois déversées dans les eaux usées – en tuant le plancton, elles perturberaient la chaîne alimentaire.[144] À la demande de la National Association of Clean Water Agencies au début 2006, l'Agence de protection de l'environnement des É.-U. étudiait en juin 2006 la possibilité de revoir les produits contenant des nanoparticules d'argent pour les classer dans la catégorie des pesticides – capables de détruire la vie végétale.[145]

3. Nanoparticules pour l'imagerie et le diagnostic biomédical

Les **points quantiques** sont des nanoparticules semi-conductrices dotées de propriétés optiques et électriques particulières. Exposées à la lumière, ces nanoparticules émettent des couleurs distinctives en fonction de leur taille (plus le point quantique est petit, plus la couleur est vive). Cela fait des dizaines d'années qu'on introduit des colorants fluorescents dans le corps pour l'imagerie médicale (pour suivre les effets de médicaments anticancéreux, par exemple), mais ils sont souvent flous et deviennent très vite invisibles. La recherche biomédicale espère que les points quantiques fluorescents seront plus précis, de couleur plus vive et de plus longue durée. On utilise déjà les points quantiques fluorescents pour suivre ou marquer du matériel biologique *in vitro* et *in vivo* en recherche animale (excluant l'être humain). On peut les injecter dans les cellules ou les fixer à des protéines pour suivre, marquer ou identifier des biomolécules spécifiques. Pour la recherche biomédicale, l'avantage potentiel des points quantiques dans l'imagerie du corps humain est leur *sensibilité extrême à la détection* – il est possible de détecter une protéine distincte marquée d'un point quantique dans une cellule vivante.[146]

On utilise déjà des points quantiques synthétiques en électronique (panneaux d'affichage et télévisions à écran plat), mais on n'a pas encore approuvé leur utilisation aux fins thérapeutiques ou diagnostiques, en grande partie à cause de préoccupations relatives à leur toxicité éventuelle. La recherche actuelle laisse croire que, « dans

certaines conditions, les points quantiques peuvent poser des risques pour l'environnement et la santé des personnes ».[147] **Le noyau central de la plupart des points quantiques est fait de cadmium et de sélénium — des substances ayant démontré des effets toxiques aigus et chroniques en fortes concentrations chez les vertébrés.**

Pour améliorer leur sûreté et leur compatibilité biologique, on encapsule leur noyau interne dans un enrobage bioactif qui les *fonctionnalise* – on peut les utiliser pour l'imagerie moléculaire ou l'administration de médicaments, par exemple. Mais si l'enrobage extérieur se dégrade, il risque d'exposer le noyau toxique. Les points quantiques peuvent rester dans les cellules pendant des semaines ou des mois – mais on ne sait à peu près rien de la façon dont ces nanoparticules se métabolisent dans le corps et on ignore leurs voies d'excrétion.[148]

Un étude récente sur les points quantiques menée par le chercheur Ron Hardman de l'Université Duke (Caroline du Nord, É.-U.) conclut qu'il ne sera pas facile d'établir les points quantiques qui posent problème : comme pour la plupart des nanoparticules, même les points similaires sur le plan chimique peuvent présenter des différences marquées sur le plan physique et toxicologique. Dans le cas des points quantiques, des éléments comme la taille, la forme et la composition du noyau métallique et de l'enrobage extérieur peuvent être des facteurs à considérer sur le plan de la toxicité. C'est pourquoi « il faudra déterminer les caractéristiques de chacun des types de points quantiques pour établir leur toxicité éventuelle. »[149]

Points de carbone? Des chercheurs de l'Université Clemson (Caroline du Sud, É.-U.) viennent de mettre au point un nouveau type de points quantiques, faits de carbone, qui seraient selon eux moins toxiques que les particules de cadmium, de sélénium ou de plomb.[150] Quand les nanoparticules de carbone sont enduites de polymères spéciaux, elles prennent des lueurs vives une fois exposées à la lumière. Les chercheurs croient que cette photoluminescence serait due à la présence sur leur surface de *pochettes* ou de trous qui captent l'énergie.

Détecteur d'ADN : Nanosphere, Inc. (Illinois, É.-U.) a mis au point un système ultrasensible – formé de deux instruments, chacun de la taille d'un ordinateur de table – pour détecter l'ADN et les protéines, qui serait « considérablement plus sensible que toute autre technique de détection » et qui « transformera du tout au tout notre conception du diagnostic ».[151] À partir d'échantillons de sang ou de salive, le détecteur d'ADN *Verigene* identifie et analyse automatiquement les acides nucléiques et les protéines. Il peut révéler, par exemple, qu'un patient présente une mutation génétique qui le prédispose à une maladie donnée ou le rend plus à risque de former des caillots lors d'une intervention chirurgicale. La société affirme que son produit peut détecter des protéines en concentrations mille fois plus faibles que les méthodes actuelles – ce qui permet de détecter une protéine libérée à l'occasion d'une crise cardiaque et peut-être, un jour, une protéine associée au stade précoce de la maladie d'Alzheimer.

Le système Verigene utilise diverses techniques pour détecter l'ADN et les protéines, mais les deux systèmes utilisent des nanoparticules d'or pour créer des censeurs hautement sélectifs et sensibles. Quand les censeurs entrent en contact avec l'échantillon, ils ciblent uniquement le gène hybride complémentaire et s'y fixent. Le système peut identifier plusieurs marqueurs génétiques en un seul test.

Les points quantiques peuvent rester dans les cellules pendant des semaines ou des mois – mais on ne sait à peu près rien de la façon dont ces nanoparticules se métabolisent dans le corps et on ignore leurs voies d'excrétion.

L'ADN peut révéler, par exemple, qu'un patient présente une mutation génétique qui le prédispose à une maladie donnée ou le rend plus à risque de former des caillots lors d'une intervention chirurgicale.

« Les thérapies de la médecine régénérative peuvent guérir pratiquement n'importe quelle maladie résultant du mauvais fonctionnement, d'un dommage ou d'une défaillance des tissus. »

– Department of Health and Human Services des É-U., *2020: A New Vision, A Future for Regenerative Medicine*. 2005[153]

Les nanotechnologies joueront un rôle de premier plan en ingénierie tissulaire parce qu'elles opèrent à l'échelle moléculaire et peuvent intégrer matériaux biologiques et matériaux inertes.

Nanocapteurs médicaux :
Des chercheurs de l'Université de l'Illinois sont en train de mettre au point un minuscule dispositif implantable pour permettre aux diabétiques de mesurer leur taux de glucose sans prélèvement sanguin.[152] Les capteurs sont faits de nanotubes de carbone – des molécules de carbone pur de forme cylindrique – naturellement fluorescents quand on les expose à un rayon infrarouge. L'objectif est de concevoir un capteur qui sera implanté juste sous la peau et enverra un signal optique une fois exposé à un rayon infrarouge. En gros, plus il y a de glucose dans le corps, plus les nanotubes seront brillants. Mais les capteurs de glucose ne sont qu'un début. Les chercheurs espèrent un jour mettre au point des capteurs pour détecter tout un éventail d'éléments biochimiques – hormones, cholestérol et médicaments.

4. Ingénierie tissulaire et implants

On dit de la médecine régénérative qu'elle est « à l'avant-garde des soins de santé du XXIe siècle » parce qu'elle permettra le remplacement ou la régénération de tissus et d'organes.[154] Des chercheurs utilisent déjà les nanotechnologies en ingénierie tissulaire, dans le but de créer *in vitro* (en laboratoire) des tissus et organes entièrement biologiques que l'on pourrait transplanter en toute sécurité dans le corps humain. Un rapport préparé en 2005 par le Department of Health and Human Services des É.-U. prédit avec enthousiasme que le marché mondial de la médecine régénérative atteindra 500 milliards $ d'ici 2010 (ces chiffres ne comprennent pas seulement la médecine régénérative à l'échelle nano).[155]

Ingénierie tissulaire :
Les nanotechnologies joueront un rôle de premier plan en ingénierie tissulaire parce qu'elles opèrent à l'échelle moléculaire et peuvent intégrer matériaux biologiques et matériaux inertes. Ainsi, les chercheurs utilisent des nanostructures capables d'autoassemblage pour créer du collagène artificiel (les protéines du tissu conjonctif qui sont les principaux composants protéiques des os, des dents et des tendons). Puisque les protéines de collagène sont un composant majeur de la structure des tissus et des organes du corps, les chercheurs espèrent utiliser le collagène artificiel nanostructuré en tant que charpente tridimensionnelle en vue de la régénération cellulaire – pour cultiver des cellules, des tissus et même des organes.[156]

Les chercheurs utilisent déjà cette technique pour cultiver du tissu vésical.[157] Aux É.-U., on traite chaque année quelque 60 000 personnes pour le cancer de la vessie en leur enlevant une partie de la vessie. Pour remplacer le tissu vésical retiré lors de l'intervention chirurgicale, les scientifiques doivent d'abord créer une charpente biocompatible sur laquelle on peut cultiver de nouvelles cellules vésicales du patient. Les chercheurs de l'Université Purdue utilisent des polymères nanostructurés (molécules à longue chaîne) biocompatibles, biodégradables et flexibles pour bâtir une charpente tridimensionnelle dotée en surface de bosses de taille nanométrique. La charpente de polymère nanostructuré est alors *ensemencée* avec des cellules vésicales prélevées sur le patient. Comme les cellules vésicales viennent du patient qui recevra le transplant, on réduit les risques de rejet du nouveau tissu. On rapporte que les cellules croissent plus vite sur une charpente ayant une surface nanotexturée. On espère qu'une fois implantée dans le corps, la charpente se dissoudra peu à peu, laissant derrière elle du tissu vésical fonctionnel.

En avril 2006, des chercheurs rapportent que les premières vessies cultivées en laboratoire et transplantées sur sept enfants et jeunes adultes fonctionnent bien depuis bientôt quatre ans.[158] Le *Washington Post* décrit cet exploit comme le Graal de la médecine : « la première fois que l'on cultive un élément fonctionnel pour remplacer un organe plein chez l'être humain ».[159] Les transplantations de vessie ont été faites sur une base expérimentale et n'ont pas encore reçu l'aval de la Food and Drug Administration des É.-U. La société qui commercialise la technologie de transplantation de la vessie, Tengion, n'a pas révélé le coût approximatif de la transplantation. La transplantation de vessies cultivées à partir des cellules du patient marque le début de l'ère de la « médecine du rajeunissement », qui permettra d'échanger des organes moins performants – en raison de l'âge ou de la maladie – contre de nouveaux modèles qui fonctionnent mieux. Certains futuristes espèrent stocker toute une panoplie de pièces de rechange – y compris des cœurs – pour pallier l'inévitable dégénérescence du corps.[160]

Matériaux de greffe osseuse :
On utilise des nanomatériaux pour développer des matériaux de remplacement osseux synthétiques plus durables, plus bioactifs et plus solides. NanoCoatings Ltd. (Australie) est en train de mettre au point une technologie visant à produire un matériau de remplacement osseux synthétique qui pourrait être greffé ou servir d'enduit bioactif sur des articulations artificielles – remplacement de la hanche ou du genou et implants dentaires, par exemple. Le matériau de greffe osseuse, encore aux premiers stades de conception, est à base d'hydroxyapathite – une substance naturelle qui est aussi le principal composant minéral de l'os et de l'émail des dents – enduite d'apatite carbonatée.[161]

La transplantation de vessies cultivées à partir des cellules du patient marque le début de l'ère de la « médecine du rajeunissement », qui permettra d'échanger des organes moins performants – en raison de l'âge ou de la maladie – contre de nouveaux modèles qui fonctionnent mieux.

Conclusion

Les nanomédicaments et l'engouement pour les technologies d'amélioration des facultés risquent d'accaparer les fonds déjà limités de la RxD consacrés à des besoins essentiels en santé.

Il est fort probable que les nanomédicaments avancés et exclusifs se révèlent largement inappropriés, inaccessibles et inabordables pour les collectivités marginalisées, tant dans le Nord que dans le Sud.

Une erreur de prescription?
Il faut inscrire dans un contexte social et politique plus large le développement de la nanomédecine et son impact sur les collectivités marginalisées. L'enjeu fondamental est celui-ci, et il ne s'applique pas seulement aux nanotechnologies : les nouvelles technologies n'offrent pas de solution aux problèmes complexes enracinés dans la pauvreté et les inégalités sociales. Les nanomédicaments et l'engouement pour les technologies d'amélioration des facultés risquent d'accaparer les fonds déjà limités de la RxD consacrés à des besoins essentiels en santé. L'importance accordée aux interventions médicales de pointe détourne l'attention et les ressources des approches non médicales axées sur le développement humain. Des interventions de base en vue d'améliorer l'hygiène et le logement, l'accès à l'eau potable et à l'éducation – entre autres – pourraient au bout du compte faire progresser davantage la santé des gens que les technologies médicales les plus avancées.

L'innovation en nanomédecine est largement contrôlée par le Nord, en fonction des besoins de santé dictés par le marché des pays de l'OCDE. De nos jours, la plus grande partie de la RxD obéit à l'impératif du profit plutôt qu'à celui des besoins humains. Les défenseurs des nanotechnologies s'empressent de citer des exemples qui démontrent l'utilité de la RD nano pour combler des besoins de santé pressants dans les pays en développement (microbe artificiel qui synthétise un antipaludique puissant, microbicide qui protège les femmes contre le VIH/sida). Mais il est fort probable que les nanomédicaments avancés et exclusifs se révèlent largement inappropriés, inaccessibles et inabordables pour les collectivités marginalisées, tant dans le Nord que dans le Sud.

La RD nano en rapport avec l'eau potable et l'énergie durable serait un investissement beaucoup plus efficace pour régler des enjeux fondamentaux en santé. Ces applications exigent toutefois une étude plus approfondie qui dépasse les limites de ce rapport.

Au cours des années à venir, on mettra davantage l'accent sur la médecine personnalisée, et la convergence technologique permettra en principe d'améliorer la structure, la fonction et les facultés du corps et du cerveau humains. On ne fera plus de distinction entre amélioration et thérapie, et cela va finir par modifier la perception sociale de la *normalité*. L'engouement pour les AFH (améliorations des facultés humaines) ne risque pas seulement de détourner les fonds déjà rares de la RD médicale au détriment des besoins de santé essentiels des personnes marginalisées. Cela va finir par creuser un *fossé des capacités*. Comme le fossé numérique, le fossé des capacités creusera l'écart entre le Nord et le Sud, et entre les riches et les pauvres partout dans le monde. Dans le contexte politique et social actuel, l'introduction de technologies d'amélioration généralisées aura pour effet de créer une nouvelle classe de marginaux.

On n'a pas encore répondu à certaines questions cruciales sur l'impact exercé sur la santé et l'environnement par les nanomatériaux utilisés dans la mise au point des nanomédicaments. Même si les défenseurs des nanotechnologies prédisent qu'elles permettront des avancées révolutionnaires en médecine, il est tout aussi plausible que certaines nanoapplications apportent dans leur sillage de nouveaux dangers pour la santé des personnes. On ne sait

pas grand-chose de la toxicologie des nanomatériaux synthétiques, et on ne peut extrapoler à partir des études toxicologiques réalisées sur de plus grosses particules de la même substance. Des études toxicologiques récentes sur l'impact des nanoparticules sur la santé et l'environnement soulèvent de motifs d'inquiétude. Il faut ajouter que, malgré la commercialisation des nanoproduits – dont certains nanomédicaments –, aucun pays au monde ne dispose d'une réglementation régissant la sécurité des nanomatériaux.

En raison de la tendance croissante à mener les essais cliniques de médicaments dans des pays en développement, il est possible que certains nanomédicaments soient testés sur des habitants du Sud mondialisé avant d'avoir été testés et approuvés par les pays du Nord. Les nanomatériaux ne sont soumis à aucune réglementation en matière d'étiquetage et il n'existe aucune définition ou norme établies pour les décrire. Compte tenu de ce vide réglementaire, on peut craindre que les pays du Sud – et les personnes qui participent aux essais cliniques – ne sachent pas vraiment si on utilise des nanotechnologies dans le cadre des essais cliniques menés sur leur territoire.

L'État doit étudier la façon dont on détermine les priorités et le financement de la RxD, et la façon dont on récompense l'innovation. L'accès aux médicaments essentiels sera-t-il déterminé par l'État ou par les firmes pharmaceutiques qui en détiennent les brevets? En mai 2006, les pays participant à l'Assemblée mondiale de la santé (AMS) – l'organe directeur de l'OMS – ont promis d'amorcer l'élaboration d'une stratégie et d'un cadre d'envergure mondiale en vue de soutenir la RxD axée sur les besoins essentiels. Ce cadre favorisera l'accès aux inventions médicales et explorera des moyens de récompenser les innovations qui ne reposent pas sur les monopoles de marché ou les prix élevés. La résolution de l'AMS est un pas ambitieux dans la bonne direction.

Certaines questions cruciales sur l'impact exercé sur la santé et l'environnement par les nanomatériaux utilisés dans la mise au point des nanomédicaments.

L'État doit étudier la façon dont on détermine les priorités et le financement de la RxD, et la façon dont on récompense l'innovation. L'accès aux médicaments essentiels sera-t-il déterminé par l'État ou par les firmes pharmaceutiques qui en détiennent les brevets?

Les nanotechnologies émergentes doivent être évaluées sur le plan scientifique, socioéconomique et sociétal pour permettre aux États de prendre des décisions éclairées quant à leurs risques, leurs avantages et leur valeur fondamentale.

Recommendations

Avant de se ruer sur la nanomédecine en tant qu'impératif technologique, la société doit s'engager à fond dans une discussion plus large sur les nanotechnologies. Les nanotechnologies émergentes doivent être évaluées sur le plan scientifique, socioéconomique et sociétal pour permettre aux États de prendre des décisions éclairées quant à leurs risques, leurs avantages et leur valeur fondamentale. Dans le cadre d'un processus plus vaste en vue d'établir les priorités en santé, les pays en développement doivent participer activement à l'évaluation du rôle que les nanotechnologies peuvent – ou doivent – jouer pour combler les besoins en santé. Pour suivre le changement technologique, nous avons besoin d'approches novatrices qui permettent de surveiller et d'évaluer l'introduction des nouvelles technologies.

Technologie et diversité :
L'introduction des technologies médicales de pointe risque d'écarter par inadvertance des interventions plus simples qui jouent présentement un rôle important en santé publique auprès de tout un pan de la population. Dans bien des pays en développement, surtout en milieu rural, 80 % des gens sont tributaires des praticiens traditionnels de la santé et des médicaments traditionnels.[162] Une stratégie de santé publique possible est de commencer par améliorer l'accès aux pratiques et connaissances existantes – plutôt qu'aux produits exclusifs issus de la RD à forte densité de capital. Le rapport émis en avril 2005 par la commission de l'OMS fait remarquer : « Il est possible d'utiliser la médecine traditionnelle à meilleur escient, en élargissant l'accès aux médicaments traditionnels et en utilisant ces connaissances pour hâter la mise au point de nouveaux traitements. »[163]

Au bout du compte, la société doit maintenir et utiliser une gamme de technologies viables et appropriées sur le plan social, économique et environnemental. Si les technologies doivent répondre à un éventail de besoins sociétaux dans un éventail de contextes culturels, il est important que les États maintiennent un éventail de technologies (anciennes et nouvelles), et qu'ils reconnaissent et encouragent les innovations technologiques autochtones, souvent boudées en raison des pressions exercées pour imposer les nouveautés technologiques dominantes.

Conformité des nanomédicaments à la santé et à la sécurité :
En collaboration avec la société civile et en consultation avec le monde scientifique, les États doivent établir un régime réglementaire *sui generis*, fondé sur le principe de précaution et spécifiquement conçu pour aborder les problèmes particuliers associés aux nanomatériaux dans le domaine de la santé et de l'environnement. (Ceci n'est cependant pas un appel en vue d'un protocole de sécurité des Nations unies sur les nanotechnologies.) Il est crucial que le débat réglementaire ne porte pas seulement sur les enjeux relatifs à la santé, la sécurité et l'environnement – il faut aussi aborder l'impact socioéconomique global, y compris le contrôle et la propriété des technologies et leur impact sur les populations marginalisées.

Pour évaluer de manière plus large les sciences et technologies nanos, y compris l'impact de la propriété intellectuelle, ETC Group recommande que les États envisagent d'imposer sur leur territoire un moratoire sur les nanotechnologies et l'ensemble des essais cliniques impliquant des

nanomatériaux, jusqu'à l'adoption d'une réglementation en vue de protéger les travailleurs, les sujets de recherche, les consommateurs et l'environnement – et jusqu'à ce que l'on ait étudié leur impact social plus large.

Nanotechnologies et propriété intellectuelle :
La propriété intellectuelle joue un rôle de premier plan dans le développement scientifique et technologique actuel – on joue déjà des coudes pour obtenir le contrôle monopolistique du formidable marché des nanotechnologies. Les brevets sur les médicaments, diagnostics et dispositifs nanos vont déterminer qui aura accès aux innovations nanos et à quel prix. Il faut examiner les implications de la propriété intellectuelle et des nanotechnologies sur le plan de la santé publique. Les États doivent exiger que l'OMS, en consultation avec l'OMPI, amorce des études pour étudier les implications particulières de la propriété intellectuelle en nanotechnologie sur le plan des pratiques monopolistiques, du transfert technologique, du commerce et de la santé publique – notamment pour les pays du Sud mondialisé.

Implications éthiques et sociales de la convergence des technologies :
Même si les technologies d'amélioration des facultés humaines (AFH) semblent bien lointaines, c'est un domaine où la recherche avance à grands pas – cela soulève des préoccupations éthiques d'une grande portée, qui doivent être abordées par l'État et la société civile. Il est crucial de tenir des débats sociétaux sur les implications éthiques, sociales et économiques des améliorations des facultés et du prolongement de la vie. L'État doit exiger que la Commission des droits de l'homme entreprenne des études sur les implications de la convergence des nanotechnologies, notamment dans le cas des personnes handicapées et d'autres populations marginalisées dans le Sud mondialisé. Dans le cadre de ce processus, on doit consulter des représentants des organismes de défense des droits des personnes handicapées ainsi que la société civile et d'autres mouvements sociaux.

À sa prochaine rencontre en 2007, l'Assemblée mondiale de la santé doit demander à l'OMS d'analyser de manière approfondie la nanomédecine et la convergence des nanotechnologies pour examiner les effets sociaux et économiques de l'amélioration des facultés humaines sur les collectivités marginalisées. Dans le cadre de ce processus, on doit consulter des représentants des organismes de défense des droits des personnes handicapées ainsi que la société civile et d'autres mouvements sociaux.

Évaluer les technologies selon une approche multilatérale juridiquement contraignante :
Plutôt que d'évaluer les technologies à la pièce, les États doivent envisager des stratégies à long terme pour superviser sur une base continue l'introduction de nouvelles technologies importantes. Pour briser le cycle des bouleversements sociaux qui suit l'introduction de chaque nouvelle technologie, la communauté internationale doit se doter d'un appareil indépendant chargé d'évaluer les nouvelles technologies majeures et de fournir un système d'alerte/d'écoute rapide. On pourrait ainsi établir un cadre intergouvernemental, la Convention internationale sur l'évaluation des nouvelles technologies – CIENT). La CIENT aurait pour but de créer un milieu sociopolitique et scientifique propice à l'évaluation éclairée et en temps opportun des nouvelles technologies, dans le cadre d'un processus participatif transparent qui favorise la compréhension et le débat sociétal, appuie l'innovation sociale

Pour évaluer de manière plus large les sciences et technologies nanos, y compris l'impact de la propriété intellectuelle, ETC Group recommande que les États envisagent d'imposer sur leur territoire un moratoire sur les nanotechnologies et l'ensemble des essais cliniques impliquant des nanomatériaux, jusqu'à l'adoption d'une réglementation en vue de protéger les travailleurs, les sujets de recherche, les consommateurs et l'environnement – et jusqu'à ce que l'on ait étudié leur impact social plus large.

Pour briser le cycle des bouleversements sociaux qui suit l'introduction de chaque nouvelle technologie, la communauté internationale doit se doter d'un appareil indépendant chargé d'évaluer les nouvelles technologies majeures et de fournir un système d'alerte/d'écoute rapide.

et scientifique, et facilite le partage équitable des bénéfices. De plus, le cadre intergouvernemental assurerait la protection des technologies utiles, classiques ou distinctes sur le plan culturel, et encouragerait notamment la diversification et la décentralisation technologiques. (Pour plus de détails sur la CIENT, voir le rapport d'ETC Group, *Nanogeopolitics*, juillet-août 2005.)

Le processus de négociation onusien en vue de l'adoption d'un accord international comme la CIENT stimulerait aussi un débat sociétal à la fois de grande envergure et aux plus hauts niveaux, tout en favorisant sur le plan des lois et institutions à l'échelle nationale et régionale des initiatives qui viendraient compléter l'accord international.

Dialogue mondial sur la nanotechnologie et les populations pauvres :
Le projet *Dialogue mondial sur la nanotechnologie et les populations pauvres : risques et possibilités* est soutenu par la Fondation Rockefeller, le Centre de recherches pour le développement international (Canada) et le Department for International Development (Royaume-Uni).[164] Pour être utile, le débat doit intégrer l'apport des représentants du Sud mondialisé et des groupes les plus exposés aux bouleversements qui découlent des nanotechnologies. Pour que les dialogues multipartites examinent l'impact potentiel des nanotechnologies selon un point de vue reflétant la diversité des parties intéressées, il est également important de prévoir la participation de représentants de pays en développement qui sont issus de la société civile et du mouvement de défense des droits des personnes handicapées, des travailleurs et du domaine de la santé.

Annexe : Glossaire de la nanomédecine

Administration ciblée des médicaments – capacité d'envoyer un agent pharmaceutique à un endroit précis du corps, par exemple, un organe ou des cellules spécifiques.

AFH – technologies ou médicaments visant l'**a**mélioration des **f**acultés **h**umaines. Certaines AFH sont mises au point dans ce but précis; on peut aussi exploiter le potentiel d'amélioration une fois le produit mis au point.

Alarmisme médical – marketing de la maladie, qui augmente le nombre de personnes qui se croient malades ou sont étiquetées comme telles, dans le but d'étendre les marchés de ceux qui vendent des médicaments ou des traitements.

Artémisinine – produit naturel extrait des feuilles d'une armoise odorante, l'Artemisia annua, qui a traité avec succès toutes les souches connues de malaria. Par biologie synthétique, des chercheurs tentent de mettre au point un dérivé microbien d'artémisinine.

BANG – acronyme formé à partir des mots bits, atomes, neurones et gènes, les unités de base des technologies convergentes – technologies de l'information, nanotechnologies, neurosciences cognitives et biotechnologie. Pour parler du BANG, le gouvernement des É.-U. utilise le terme de NBIC (nano-bio-info-cogno) et l'Europe les appelle CTEKS (Converging Technologies for the European Knowledge Society – Technologies convergentes pour la société européenne du savoir). Au Canada, on utilise le terme de synthèse biosystémique.

Biodisponibilité – caractéristique d'un nutriment ou agent pharmaceutique qui décrit la proportion dans laquelle le nutriment ou médicament peut être utilisé par le corps. La formulation de médicaments en nanoparticules semble accroître leur biodisponibilité.

Biologie synthétique – création en laboratoire de nouveaux systèmes vivants que l'on peut programmer en vue de tâches précises. Quand la biologie synthétique implique l'intégration de parties vivantes et inertes à l'échelle nanométrique, on parle alors de nanobiotechnologie.

Cytotoxique – toxique pour les cellules. Il existe des données scientifiques suggérant que certaines formes de nanomatériaux sont cytotoxiques.

Dendrimère – molécule tridimensionnelle à l'échelle nanométrique qui tire son nom de ses structures, semblables aux branches d'un arbre (*dendrons*). Les dendrimères peuvent accueillir, dans leurs cavités internes ou à leur surface, de plus petites molécules à libération graduelle, ce qui en fait des agents prometteurs pour l'administration des médicaments ou la libération contrôlée de substances dans les parfums et les herbicides.

Effets quantiques – propriétés optiques, électriques ou structurales particulières à l'échelle nanométrique, démontrées par les nanomatériaux d'une taille inférieure à environ 100 nm. En général, seules les substances d'une taille inférieure à 100 nm dans au moins une dimension peuvent révéler des effets quantiques. On a cependant constaté l'apparition de propriétés particulières à des tailles supérieures à 100 nm – entre autres, dans des polymères renforcés avec des nanoparticules, ce qui a eu pour effet de lier les deux matériaux.

Fardeau mondial des maladies (FMM) – mesure totale des pertes de santé par maladie ou blessure, à partir d'une estimation de la mortalité et de la morbidité selon l'âge, le sexe ou la région.

Maladie orpheline – maladie n'ayant pas été adoptée par l'industrie pharmaceutique parce que la fabrication et la mise en marché de nouveaux médicaments pour la prévenir ou la traiter présentent peu d'intérêt sur le plan financier. Il peut s'agir de maladies rares qui affectent très peu de personnes ou de maladies courantes que l'on ignore (par ex., tuberculose, choléra, typhoïde et malaria) parce qu'elles sont beaucoup plus répandues dans le Sud mondialisé que dans le Nord. (Adapté de : http://www.medterms.com/script/main/art.asp?articlekey=11418, consulté le 27 juillet 2006)

Médecine personnalisée – en gestion de la santé, approche qui se fonde sur le profil génétique du patient pour détecter la prédisposition à une maladie donnée ou le niveau de réceptivité à un agent pharmaceutique particulier.

Médicaments essentiels – selon l'Organisation mondiale de la santé, les médicaments essentiels sont ceux qui peuvent combler les besoins de santé prioritaires d'un pays ou d'une région de manière efficace et sécuritaire.

Microbicide – agent pharmaceutique capable de détruire les virus ou les agents pathogènes.

Molécule – ensemble d'atomes solidement liés les uns aux autres. S'utilise normalement dans le cas d'une particule dont le nombre d'atomes peut être compté (de quelques-uns à quelques milliers).

Nanobille – petite particule d'un diamètre de plusieurs centaines de nanomètres, fabriquée à partir de techniques de nano-ingénierie, formée d'un noyau (généralement du silice) et d'un enduit (généralement de l'or).

Nanoparticule – petite parcelle de matière formée d'un élément ou d'un composé d'éléments, d'un diamètre généralement inférieur à 100 nanomètres. Le terme englobe un vaste éventail de matériaux, y compris la matière expulsée sous forme de particules par le système d'échappement des voitures. On fabrique des nanoparticules à des fins commerciales depuis une vingtaine d'années, le plus souvent pour en exploiter les **effets quantiques**.

Nanotube – molécule de forme cylindrique qui ressemble à un rouleau de treillis métallique. Les nanotubes sont formés de diverses substances, mais la plus grande partie de la recherche porte sur les tubes formés d'atomes de carbone pur. Les nanotubes de carbone sont 100 fois plus solides que l'acier, peuvent résister à des températures jusqu'à 6500 degrés Fahrenheit et ont une épaisseur d'à peine un ou quelques nanomètres.

Point quantique – nanoparticule (quelques centaines à quelques milliers d'atomes) dotée de propriétés optiques extraordinaires que l'on adapte en modifiant la taille ou la composition de la particule. Les points quantiques absorbent la lumière et la réfléchissent très vite dans une couleur différente. On peut les *accorder* à n'importe quelle longueur d'onde par simple modification de la taille, ce qui les rend utiles pour le marquage biologique dans le diagnostic et la mise au point des médicaments.

Polymère – substance naturelle ou artificielle formée de molécules à longue chaîne. Le plastique est le polymère artificiel le plus connu.

Transhumanisme – conception selon laquelle la race humaine serait à un stade de développement rudimentaire, et qui préconise le recours aux technologies pour modifier les facultés actuelles du corps et de l'esprit humains. Le transhumanisme embrasse le concept de personnes *mieux que bien*.

Notes de fin

Les notes pour les encadrés et les tableaux se trouvent à la fin de la section de notes.

1 Calestous Juma et Lee Yee-Cheong, « Innovation : applying knowledge in development », projet des Nations unies pour le Millénaire, Groupe de travail sur la science, la technologie et l'innovation, 2005, p. 69 et suivantes. En ligne : http ://bcsia.ksg.harvard.edu/BCSIA_content/documents/TF-Advance2.pdf.

2 NanoMarkets, White Paper : Nano-Enabled Drug Delivery Systems Market, décembre 2004, p. 6-7.

3 OMS, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle,* rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, avril.
http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/CIPIHReport23032006.pdf.

4 David Rejeski, directeur, Project on Emerging Nanotechnologies, Woodrow Wilson International Center for Scholars, témoignage devant la Chambre des représentants des É.-U., 17 novembre 2005.

5 *Ibid.*

6 Fondation européenne de la science, *ESF Forward Look on Nanomedicine 2005*. En ligne : http ://www.esf.org/publication/214/Nanomedicine.pdf. (en anglais seulement)

7 http ://www.cihr-irsc.gc.ca/f/28268.html

8 Lux Research, Inc., www.luxresearchinc.com.

9 Lux Research, Inc. Lux inclut la purification de l'eau, l'alimentation, l'agriculture et les cosmétiques parmi les *sciences du vivant*. Lux Research précise cependant que la partie la plus importante de ces fonds est consacrée directement aux applications médicales.

10 Lynn Yoffee, « Nanomedicine and nano device pipeline surges 68% », *NanoBiotech News*, 4 janvier 2006.

11 *2006 Nanomedicine, Device and Diagnostic Report*, de l'éditeur de *NanoBiotech News*, 2006.

12 Lynn Yoffee, « Nanomedicine and nano device pipeline surges 68% », *NanoBiotech News*, 4 janvier 2006.

13 Lux Research Inc., étude 2006, *The Nanotech Report*, 4e éd. Les données attribuées à Lux dans les paragraphes suivants sont tirées de cette étude : www.luxresearchinc.com.

14 *2006 Nanomedicine, Device and Diagnostic Report*, de l'éditeur de *NanoBiotech News*, 2006, p. 4.

15 Douglas W. Jamison, président de Harris & Harris Group, Inc., est cité dans *2006 Nanomedicine, Device and Diagnostic Report*, de l'éditeur de *NanoBiotech News*, 2006, p. 2.

16 Une estimation générale, ce chiffre a été calculé à partir des fonds accordés par la National Nanotechnology Initiative au Department of Health and Human Services, qui inclut les National Institutes of Health et NIOSH, http ://www.nano.gov/html/about/funding.html.

17 Communiqué de presse du National Cancer Institute, « National Cancer Institute Awards $26.3 Million to Establish Eight Centers of Cancer Nanotechnology Excellence », 3 octobre 2005; mis à jour en février 2006. En ligne : http ://nano.cancer.gov/alliance_awards/press/pr_2005_10_03.asp#update.

18 http ://nano.cancer.gov/about_alliance/mission.asp.

19 Communication personnelle avec Uta Faure, …

20 Document du bureau du conseiller national des sciences auprès du Premier ministre, *A Summary of Canadian Nanomedicine Research Funding*, 11-12 octobre 2005.

21 Brochure du National Cancer Institute, « Cancer Nanotechnology : Going Small for Big Advances », p. 7. En ligne : http ://nano.cancer.gov/resource_center/exploring.asp.

22 Jeffery Schloss, coprésident, National Institutes of Health Nanomedicine Roadmap Initiative, National Institutes of Health, U.S. Department of Health and Human Services, témoignage devant le comité du Sénat des É.-U. sur le commerce, les sciences et le transport, 15 février 2006.

23 Brochure du National Cancer Institute, « Cancer Nanotechnology : Going Small for Big Advances », p. 7. En ligne : http ://nano.cancer.gov/resource_center/exploring.asp.

24 NCI Alliance for Nanotechnology in Cancer, « Mission to the Inside of a Living Cell », mai 2006. En ligne : http ://nano.cancer.gov/news_center/monthly_feature_2006_may.asp.

25 http ://ncl.cancer.gov/

26 Voir la définition des nanotechnologies sur le site Web de la National Science Foundation : http ://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/omb_nifty50.jsp (consulté le 13 juillet 2004).

27 Brochure du National Cancer Institute, « Cancer Nanotechnology : Going Small for Big Advances », p. 17. En ligne : http ://nano.cancer.gov/resource_center/exploring.asp.

28 *NanoMarkets*, « The Impact of Nanotechnology in Drug Delivery : Global Developments, Market Analysis and Future Prospects », 21 mars 2005. Voir www.nanomarkets.net.

29 Sur le site Web d'Elan : http ://www.elan.com/EDT/nanocrystal%5Ftechnology/.

30 Selon la FDA, la *bioéquivalence* est : « l'absence de différence significative dans le taux et la mesure dans lesquels l'ingrédient ou la partie active d'équivalents ou de substituts pharmaceutiques devient disponible au site d'action du médicament lorsqu'administré à la même dose molaire dans des conditions similaires, selon une étude conçue de façon appropriée. Dans le cas d'une différence intentionnelle du taux (par ex., pour certaines formes dosifiées à libération prolongée), certains équivalents ou substituts pharmaceutiques peuvent être considérés comme bioéquivalents s'il n'y a pas de différence significative de la mesure dans laquelle l'ingrédient ou la partie active devient disponible au site d'action du médicament. Cela s'applique seulement si la différence dans le taux de disponibilité de l'ingrédient ou de la partie active au site de l'action du médicament est intentionnelle et se reflète dans l'étiquetage proposé, qu'elle n'est pas essentielle à l'atteinte de concentrations corporelles efficaces en cas d'usage chronique, et qu'elle est considérée comme négligeable sur le plan médical pour le médicament. » Voir : http ://a257.g.akamaitech.net/7/257/2422/01apr20051500/edocket.access.gpo.gov/cfr_2005/aprqtr/21cfr320.1.htm.

31 Cité dans R. Ramachandran, « Token gesture for nanoscience », *Frontline Online*, vol. 23, no 13, 1-14 juillet 2006. En ligne : http ://www.flonnet.com/stories/20060714003911300.htm (consulté le 8 juillet 2006).

32 Mary C. Till et autres, « Nanotech Meets the FDA : A Success Story About the First Nanoparticulate Drugs Approved by the FDA », *Nanotechnology Law & Business*, vol. 2, no 2, mai 2005.

33 *Ibid.*

34 *Ibid.*

35 Lux Resarch Inc., *The Nanotech Report 2004*, vol. 1, p. 199.

36 Voir, par exemple, Philip E. Ross, « Tiny Toxins? », *Technology Review*, mai 2006, qui résume les enjeux et cite diverses études toxicologiques récentes, dont certaines présentent des résultats troublants, même si aucune n'est définitive.

37 Voir, par exemple, Auteur inconnu, « Nanotube toxicity linked to functionalization », 3 novembre 2005, http ://nanotechweb.org/articles/news/4/11/3/1.

38 Voir l'inventaire des produits compilé par le Woodrow Wilson International Center for Scholars, http ://www.nanotechproject.org/consumerproducts/.

39 Thomas C. Long et autres, « Titanium Dioxide (P25) Produces Reactive Oxygen Species in Immortalized Brain Microglia (BV2) : Implications for Nanoparticle Neurotoxicity », *Environ. Sci. Technol.,* paru sur Internet le 7 juin 2006. Résumé analytique en ligne : http ://pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/esthag/asap/abs/es060589n.html.

40 Communiqué de presse de Frost & Sullivan, « Nanotechnology Holds Promise of Revolutionising European Drug Discovery Markets », 30 mai 2006. En ligne : http ://www.healthcare.frost.com (consulté le 21 juin 2006).

41 Liz Kalaugher, « Nanoparticle size affects uptake by cells » 17 mars 2006. En ligne : http ://nanotechweb.org/articles/news/5/3/10 (consulté le 21 juin 2006).

42 *Ibid.*

43 G. Oberdörster et autres, « Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain », *Inhalation Toxicology*, 16(6-7), pp. 437-445. En ligne : http ://www.mindfully.org/Health/2004/Nonoparticles-On-Brain2004.htm (consulté le 7 juillet 2006).

44 Ray Kurzweil, « Reprogramming Biology », *Scientific American*, juillet 2006. Voir aussi, Kurzweil, « Trends hint at a golden era of nanotechnology », *Science & Theology News Online*, 11 mai 2006. En ligne : http ://www.stnews.org/commentary-2820.htm.

45 Voir Ray Moynihan et David Henry, « The Fight Against Disease Mongering : Generating Knowledge for Action », *PloS Medicine*, vol. 3, no 4, avril 2006. En ligne : www.plosmedicine.org.

46 Gregor Wolbring, « The unenhanced underclass », dans Paul Miller, James Wilsdon, éd., *Better Humans? The politics of human enhancement and life extension*, Demos, collection 21, 2006, p. 125. En ligne : www.demos.co.uk.

47 *Ibid.*, p. 126.

48 Voir, par exemple, Leon Kass et autres, *Beyond Therapy : Biotechnology and the Pursuit of Happiness*, President's Council on Bioethics, octobre 2003. En ligne : http ://www.bioethics.gov/reports/.

49 Gregor Wolbring, « The unenhanced underclass » dans *Better Humans? The politics of human enhancement and life extension*, édité par Paul Miller et James Wilsdon, 2006, pp. 122-128.

50 Site Web de l'Association mondiale des transhumanistes (WTA) : www.betterhumans.com.

51 Voir http ://www.sens.org/.

52 Voir, par exemple, Nick Bostrom, « The Transhumanist FAQ : A General Introduction », Version 2.1 (2003), p. 21. En ligne : http ://www.transhumanism.org/resources/faq.html. « Le progrès technologique ne règle pas le vieux casse-tête politique de la redistribution adéquate des revenus. Il peut cependant augmenter de façon substantielle la taille de la tarte à partager. »

53 http ://kidshealth.org/parent/medical/bones/dwarfism.html.

54 Auteur inconnu, « Robust black market for rarely prescribed drug », Associated Press, 9 juin 2006. En ligne : http ://msnbc.msn.com/id/13212311 (consulté le 28 juin 2006).

55 Stephen S. Hall, « The Short of It », *The New York Times*, 16 octobre 2005, en ligne : http ://www.shortsupport.org/News/0522.html (consulté le 28 juin 2006).

56 *Ibid.*

57 Michael Freemark, « Growth Hormone Treatment of 'Idiopathic Short Stature :' Not so Fast », *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 89, no 7, 2004, pp. 3138-3139.

58 Roger Highfield, « Magnetic field 'can boost brain », *The Telegraph Online* (R.-U.), 7 juin 2006. En ligne (consulté le 26 juin 2006) : http ://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml?xml=/news/2006/06/07/wbrain07.xml&sSheet=/news/2006/06/07/ixnews.html.

59 Joel Garreau, « Enhancing the Warriors » *Fortune*, 30 mai 2005. En ligne : http ://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2005/05/30/8261230/index.htm.

60 http ://www.darpa.mil/dso/thrust/biosci/cap.htm

61 http ://www.bausch.com/us/resource/surgical/refractive/evolution.jsp

62 David S. Cloud, « Perfect Vision Is Helping and Hurting Navy », *The New York Times*, 20 juin 2006.

63 Expression empruntée à une série d'essais sur l'amélioration des facultés humaines publiée chez Demos (R.-U.) : Paul Miller et James Wilsdon, éd., *Better Humans? The politics of human enhancement and life extension*, 2006. En ligne : http ://www.demos.co.uk/catalogue/betterhumanscollection#essays

64 Jan C. Schmidt, « Unbounded Technologies : Working Through the Technological Reductionism of Nanotechnology », dans D. Baird, A. Nordmann et J. Schummer (éd.), *Discovering the Nanoscale*, Amsterdam : IOS Press, 2004, pp. 45-46.

65 On peut consulter *La nouvelle Atlantide* de Bacon en ligne (en anglais) : http ://oregonstate.edu/instruct/phl302/texts/bacon/atlantis.html.

66 *Ibid.*

67 *Ibid.*

68 Mihail C. Roco, « Coherence and Divergence of Megatrends in Science and Engineering », p. 80, dans Roco, M., Bainbridge, W. (éd.), *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*, National Science Foundation/Department of Commerce Report, 2002.

69 Roco, M., Bainbridge, W. (éd.), *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science*, National Science Foundation/Department of Commerce Report, 2002.

70 Raymond Bouchard, « Bio-Systemics Synthesis », Science and Technology Foresight Pilot Project (STFPP), rapport de recherche no 4, juin 2003.

71 Voir le communiqué d'ETC Group, « The Little BANG Theory », no 78, mars-avril 2003, http ://www.etcgroup.org.

72 Raymond Bouchard, « Bio-Systemics Synthesis », Science and Technology Foresight Pilot Project (STFPP), projet de recherche no 4, juin 2003, p. 33. sur le caractère réplicant des nanotechnologies, Bouchard déclare : « Les nanodispositifs sont susceptibles de se reproduire par nanoassemblage ».

73 Ray Kurzweil, *The Singularity is Near : When Humans Transcend Biology*, Viking Penguin, 2005, p. 212.

74 http ://www.utoronto.ca/jcb/home/news_nano_dev_countries.htm

75 Il y a 8 objectifs du Millénaire pour le développement. Voir http://www.un.org/french/millenniumgoals/. Sur la façon dont les nanotechnologies pourraient y contribuer, voir Calestous Juma et Lee Yee-Cheong, *Innovation : applying knowledge in development*, Projet du Millénaire des Nations unies, groupe de travail sur les sciences, la technologie et l'innovation, 2005, pp. 69 et suivantes. En ligne : http ://bcsia.ksg.harvard.edu/BCSIA_content/documents/TF-Advance2.pdf.

76 Salamanca-Buentello, F., Persad, D.L., Court, E.B., Martin, D.K., Daar A.S. et autres, « Nanotechnology and the developing world », *PLoS Med* 2(4) : e97, 2005.

77 Médecins Sans Frontières, communiqué de presse, « As WHO and UNAIDS Call For Global Treatment Scale-Up, MSF Asks : Where Will the Essential Drugs Come From? », 28 mars 2006. En ligne : http ://www.doctorswithoutborders.org/pr/2006/03-28-2006.

78 Organisation mondiale de la santé, Rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle*, avril 2006 p. 194 En ligne : http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/en/index.html

79 *Ibid.*

80 Nicholas de Torrenté, directeur général, Médecins Sans Frontières-É.-U. Médecins Sans Frontières, « Neglected Diseases : Forgotten Lives », ALERT, printemps 2003, vol. 7, no 1, p. 4. En ligne : http ://www.doctorswithoutborders.org/publications/alert/2003/alert_4-2003.pdf.

81 *Ibid.* Pour une mise à jour, voir Médecins Sans Frontières, communiqué de presse, « Governments Must Move Forward with Global R&D Framework at World Health Assembly », 19 mai 2006. En ligne : http ://www.doctorswithoutborders.org/pr/2006/05-19-2006.cfm.

82 Sophie Hebden, « WHO highlights disease from unhealthy environments », *SciDev.Net*, 19 juin 2006. En ligne : www.scidev.net.

83 Annette Pruss-Ustun et autres, « Unsafe Water, Sanitation and Hygiene », dans *Comparative Quantification of Health Risks*, Organisation mondiale de la santé, 2004.

En ligne : http ://www.who.int/publications/cra/chapters/volume2/1321-1352.pdf. Voir aussi : Poverty-Environment Partnership, *Linking Poverty Reduction and Water Management*. En ligne : http ://www.who.int/water_sanitation_health/resources/povertyreduc2.pdf.

84 Organisation mondiale de la santé, rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle*, avril 2006 p. 28. En ligne : http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/en/index.html.

85 Malaria R&D Alliance, *Malaria Research and Development : An Assessment of Global Investment,* PATH, 2006. En ligne : http ://www.malariaalliance.org/PDFs/RD_Report_complete.pdf.

86 Pour plus d'information, voir Marcia Angell, *The Truth About the Drug Companies : How They Deceive Us and What to Do About It,* Random House, 2004.

87 *Ibid.*, p. 8.

88 ETC Group, « Oligopoly, Inc. », communiqué, novembre-décembre 2005. En ligne : www.etcgroup.org.

89 Marcia Angell, *The Truth About the Drug Companies : How They Deceive Us and What to Do About It,* New York : Random House, 2004, pp. 16-17.

90 Marc Kaufman, « Drug Firms' Deals Allowing Exclusivity : Makers of Generics Being Paid to Drop Patent Challenges, FTC Review Finds », *Washington Post*, 25 avril 2006.

91 Marcia Angell, *The Truth About the Drug Companies : How They Deceive Us and What to Do About It,* New York : Random House, 2004, pp. 119-122.

92 Cité dans R. Ramachandran, « Token gesture for nanoscience », *Frontline Online*, vol. 23, no 13, 1-14 juillet 2006. En ligne : http ://www.flonnet.com/stories/20060714003911300.htm (consulté le 8 juillet 2006).

93 Pour plus d'information, voir Organisation mondiale de la santé, rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle*, avril 2006. En ligne : http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/en/index.html.

94 Anand Giridharadas, « U.S. Pushes to Limit Generic-Drug Rights in Trade Pacts », *International Herald Tribune*, 19 avril 2006.

95 *Ibid.*

96 NanoMarkets, « White Paper : Nano-Enabled Drug Delivery Systems Market », décembre 2004, pp. 6-7.

97 Jennifer Kahn, « A Nation of Guinea Pigs », *Wired*, mars 2006. En ligne : http ://www.wired.com.

98 BBC News, « Drug Trials Outsourced to India », 22 avril 2006. En ligne : http ://news.bbc.co.uk/1/hi/world/south_asia/4932188.stm.

99 Bette Hileman, « Regulatory Trends », *Chemical & Engineering News*, 19 juin 2006, p. 95.

100 *2006 Nanomedicine, Device and Diagnostic Report*, de l'éditeur de *NanoBiotech News*, 2006, p. 3.

101 http ://www.who.int/medicines/services/essmedicines_def/en/

102 Richard Laing et autres, « 25 Years of the WHO Essential Medicines List : Progress and Challenges », *The Lancet*, vol. 361, 17 mai 2003.

103 Pour la description (en anglais) des médicaments essentiels selon l'OMS, voir en ligne : http ://www.who.int/topics/essential_medicines/en/.

104 Organisation mondiale de la santé, *The World Medicines Situation*, 2004, p. 61. En ligne : http ://www.who.int/publications/en/. Les données citées dans ce rapport sont tirées de l'enquête menée par l'OMS en 1999 sur les médicaments dans le monde. On peut consulter *The World Drug Situation*, 1988 en ligne : http ://www.who.int/publications/en/.

105 *Ibid.*

106 OMS, rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle*, avril 2006, p. 16. En ligne : http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/CIPIHReport23032006.pdf.

107 Heemskerk, W., Schallig, H.D.F.H., Steenhuijsen Piters, de, B., *The World of Artemesia in 44 Questions* Amsterdam, Royal Tropical Institute, Pays-Bas, mars 2006. En ligne : http ://www.kit.nl/frameset.asp?/specials/html/ma_publications.asp&frnr=1&.

108 http ://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sb-PBD-anti-malarial.html

109 Dae-Kyun Ro et autres, « Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast » *Nature*, 440, pp. 940-943 (13 avril 2006).

110 Robert Sanders, « Milestone in Quest for Cheap Antimalarial », UC Berkeley News, 12 avril 2006. En ligne : http ://www.berkeley.edu/news/media/releases/2006/04/12_malaria.shtml.

111 http ://www.artemisininproject.org/Partners/amyris.htm.

112 Voir, par exemple, « Global Campaign for Microbicides », www.global-campaign.org.

113 Voir le site Web de Starpharma : http ://www.starpharma.com/framemaster.htm.

114 Communiqué de presse de Starpharma, « VivaGel is a Potent Contraceptive in Animal Model », 14 juin 2006.

115 « VivaGel Could Cure Starpharma's Stock », *Forbes/Wolfe Nanotech Report*, vol. 5, no 6, juin 2006, pp. 1-2.

116 *Ibid.*

117 Catherine Brahic, « Studies disagree on safety of lemon juice against HIV », 12 avril 2006, *SciDev.net*. En ligne : http ://www.scidev.net/News/index.cfm?fuseaction=readNews&itemid=2780&language=1.

118 Voir le site Web du Fonds des Nations unies pour la population : http ://www.unfpa.org/swp/2005/english/ch4/chap4_page2.htm.

119 Eldis reçoit des fonds de Sida, du NORAD, du DFID et de la SDC, et fait partie d'une famille de services de partage du savoir offerts par l'Institute of Development Studies, Sussex : http ://www.eldis.org/hivaids/new/prevention/microbicides.htm.

120 Pour une analyse du Nonoxynol-9 (N9) : http ://www.eldis.org/hivaids/new/prevention/microbicides.htm. Voir aussi Phillips, David M., Kristin M. Sudol, Clark L. Taylor, Laura Guichard, Robert Elsen et Robin A. Maguire, « Lubricants containing N-9 may enhance rectal transmission of HIV and other STIs », *Contraception,* 70(2) : 107–110.

121 http ://www.starpharma.com/framemaster.htm

122 Le Fonds mondial, « The Status and Impact of the Three Diseases : HIV/AIDS », p. 3.

123 Jon Cohen, « The New World of Global Health », *Science*, vol. 311, 13 janvier 2006, p. 167.

124 Bette Hileman, « Malaria Control », *Chemical & Engineering News*, 24 juillet 2006, p. 30.

125 Le Fonds mondial, « The Status and Impact of the Three Diseases : Tuberculosis », p. 2.

126 Éditorial, « Roll Back Malaria : a failing global health campaign », *BMJ*, 328 :1086-1087 (8 mai 2004). En ligne : http ://bmj.bmjjournals.com/cgi/content/full/328/7448/1086 (consulté le 30 juillet 2006).

127 Celia W. Dugger, « Push for New Tactics as War on Malaria Falters », *The New York Times*, 28 juin 2006.

128 Jon Cohen, « The New World of Global Health », *Science*, vol. 311, 13 janvier 2006.

129 National Cancer Institute, NCI Alliance for Nanotechnology in Cancer – Monthly Feature, « Nanotechnology Driving Big Advances in Cancer Imaging », avril 2006.

130 *Ibid.*

131 Interview de *Nova* avec Naomi Halas, « Working with Nanoshells : A conversation with Naomi Halas », réalisée le 3 février 2005. En ligne : http ://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/3209/03-nanoshells.html.

132 Communiqué de presse de Nanospectra, « Nanospectra Biosciences Receives Additional $500,000 NSF Cancer Grant : SBIR Phase II Grant Funds Continued Development of Cancer Therapy », 10 février 2006. En ligne : http ://www.nanospectra.com/News.htm (consulté le 20 juin 2006).

133 *Ibid.*

134 Interview de *Nova* avec Naomi Halas, « Working with Nanoshells : A conversation with Naomi Halas », réalisée le 3 février 2005. En ligne : http ://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/3209/03-nanoshells.html.

135 Le proche infrarouge est l'infraroughe ayant la longueur d'onde la plus proche du spectre visible. L'infrarouge est littéralement *sous le rouge*, puisque c'est le rouge qui a la longueur d'onde la plus longue du spectre visible. Pour une description des techniques d'imagerie dans le proche infrarouge, voir le Conseil national de recherches Canada, « L'imagerie spectroscopique dans le proche infrarouge », juin 2005. En ligne : http://www.nrc-cnrc.gc.ca/highlights/2005/0506nir_spectroscopy_f.html (consulté le 20 juin 2006).

136 Interview de *Nova* avec Naomi Halas, « Working with Nanoshells : A conversation with Naomi Halas », réalisée le 3 février 2005. En ligne : http ://www.pbs.org/wgbh/nova/sciencenow/3209/03-nanoshells.html.

137 http ://www.nanospectra.com/Aurolase.htm (consulté le 20 juin 2006)

138 Bethany Halford, « A Silver Bullet for Infections? » *Chemical and Engineering News*, 17 avril 2006, p. 35-36. En ligne : http ://pubs.acs.org/cen/science/84/8416sci1c.html.

139 *Ibid.*

140 Site Web de Smith & Nephew , « FAQ about Acticoat ». En ligne : http ://wound.smith-nephew.com/uk/node.asp?NodeId=2817.

141 David Tobler et Lenna Warner, « Nanotech Silver Fights Microbes in Medical Devices », Medical Device & Diagnostic Industry, mai 2005. En ligne : http ://www.devicelink.com/mddi/archive/05/05/029.html.

142 Bethany Halford, « A Silver Bullet for Infections? » *Chemical and Engineering News*, 17 avril 2006, pp. 35-36. En ligne : http ://pubs.acs.org/cen/science/84/8416sci1c.html.

143 Mark T. Sampson, « Self-cleaning' suits may be in your future », *EurekAlert*, 22 novembre 2004. En ligne : http ://www.eurekalert.org/pub_releases/2004-11/acs-sm111904.php (consulté le 18 août 2006).

144 Rhonda L. Rundle, « This War Against Germs Has a Silver Lining » *Wall Street Journal*, 6 juin 2006, Page D1.

145 *Ibid.*

146 De D. R. Larson et autres, *Science*, 2003, 300 : 1434-1436.

147 Ron Hardman, « A Toxicologic Review of Quantum Dots : Toxicity Depends on Physicochemical and Environmental Factors », *Environmental Health Perspectives*, vol. 114, no 2, février 2006.

148 *Ibid.*, p. 167.

149 *Ibid.*

150 National Cancer Institute, NCI Alliance for Nanotechnology, *Nanotech News*, 5 juin 2006.

151 Kevin Bullis, « Sensitive Nano Test for Heart Attack, Alzheimer's », *Technology Review*, 31 mai 2006. En ligne : www.techreview.com.

152 Sarah Goforth, « The Tiniest Test Kits : A Medical Future for Carbon Nanotubes », National Science Foundation. En ligne : http ://www.nsf.gov/discoveries/disc_summ.jsp?cntn_id=103060&org=NSF.

153 *2020 : A New Vision, A Future for Regenerative Medicine.* U.S. Department of Health and Human Services, 2005, p. 1. En ligne : http ://tengion.com/library/a_new_vision.pdf.

154 *Ibid.*

155 *Ibid.*

156 Deux entreprises nanos qui travaillent à la mise au point de nanocollagène pour l'ingénierie tissulaire : NanoMatrix Inc., http ://www.nanomatrix.biz/ et Zyvex, http ://www.zyvex.com/Products/CFMC_001a.html.

157 NCI Alliance for Nanotechnology in Cancer, *Nanotech News*, « Nanostructured Scaffold Growing New Bladder Tissue », 1er août 2005. En ligne : www.cancer.gov.

158 Rick Weiss, « First Bladders Grown in Lab Transplanted », *Washington Post*, 6 avril 2006.

159 *Ibid.*

160 Ray Kurzweil, « Reprogramming Biology », *Scientific American*, juillet 2006.

161 Auteur inconnu, « Nanocoated Bioactive Bone Graft Materials Developers are Looking for Collaborators », 19 juin 2006. http ://www.azonano.com/news.asp?newsID=2469.

162 OMS, rapport de la Commission sur les droits de propriété intellectuelle, l'innovation et la santé publique, *Santé publique, innovation et droits de propriété intellectuelle*, avril 2006. En ligne : http ://www.who.int/intellectualproperty/documents/thereport/en/index.html.

163 *Ibid.*, p. 204.

164 Pour plus d'information, voir : http ://www.nanoandthepoor.org/.

Notes de l'encadré 1: La *santé*, ça compte!

1 Cette analyse se fonde sur les travaux du Dr Gregor Wolbring, de l'Université de Calgary. Voir G. Wolbring, *The Triangle of Enhancement Medicine, Disabled People, and the Concept of Health: A New Challenge for HTA, Health Research, and Health Policy*, Alberta Heritage Foundation for Medical Research, HTA Inititiative # 23, décembre 2005, en ligne : http://www.ahfmr.ab.ca/publications/. Le Dr Wolbring est l'un des membres fondateurs du Center for Nanotechnology in Society de l'Université de l'Arizona (É.-U.); il est directeur général de l'International Center for Bioethics, Culture and Disability (www.bioethicsanddisability.org) et siège au conseil d'administration d'ETC Group.

2 http://www.who.int/about/fr/index.html

Notes de l'encadré 2: Multiplier les médicaments: la meilleure arme contre les maladies?

2 http://www.who.int/about/fr/index.html

3 John B. McKinlay et Sonja M. McKinlay,« The Questionable Contribution of Medical Measures to the Decline of Mortality in the United States in the Twentieth Century », *Milbank Quarterly 1977*, 55, pp. 405-429.

4 Allocution du Dr Frank R. Lichtenberg, professeur, Business School de l'Université Columbia, « Better Health, Longer Lives: The Case for Paying for New Drugs », 9 décembre 2003; transcription révisée en ligne : http://www.manhattan-institute.org/html/cmp12-03.htm (consulté le 18 juillet 2006).

5 John B. McKinlay et Sonja M. McKinlay, « The Questionable Contribution of Medical Measures to the Decline of Mortality in the United States in the Twentieth Century », *Milbank Quarterly 1977*, 55, pp. 405-429.

6 Voir http://www.manhattan-institute.org/html/medical_progress.htm (consulté le 19 juillet 2006).

7 Allocution du Dr Frank R. Lichtenberg, professeur, Business School de l'Université Columbia, « Better Health, Longer Lives: The Case for Paying for New Drugs », 9 décembre 2003; transcription révisée en ligne : http://www.manhattan-institute.org/html/cmp12-03.htm (consulté le 18 juillet 2006).

8 Frank R. Lichtenberg, « The Impact of New Laboratory Procedures and other Medical Innovations on the Health of Americans, 1990-2003: Evidence from Longitudinal, Disease-Level Data », document de travail 12120 du National Bureau of Economic Research, mars 2006.

9 On peut consulter le curriculum vitae du Dr Frank Lichtenberg en ligne : http://www0.gsb.columbia.edu/faculty/flichtenberg/cv.html (consulté le 19 juillet 2006).

Notes de l'encadré 4: Aborder la santé mondiale sous l'angle du Grand défi : est-ce que ça fonctionne?

10 Jon Cohen, « The New World of Global Health », *Science*, volume 311, 13 janvier 2006, p. 162.

11 Ibid.

12 Timothy L. O'Brien et Stephanie Saul, « Buffett to Give Bulk of Fortune to Gates Charity », *New York Times*, 26 juin 2006.

13 « The Business of Giving », *The Economist*, 23 février 2006.

14 Jon Cohen, « The New World of Global Health », *Science*, volume 311, 13 janvier 2006, p. 167.

15 *Ibid.*

Notes du tableau 2: Des technologies qui appliquent/pourraient appliquer les AFH

1 Ray Moynihan, Iona Heath, David Henry, « Selling sickness: the pharmaceutical industry and disease mongering, » *BMJ,* 324:886-891, 13 avril 2002. En ligne : http://bmj.bmjjournals.com/cgi/content/full/324/7342/886?/ijkey=15c0fc0542f3d9c84bcbac1b94a90421b64b523e&keytype2=tf_ipsecsha.

2 Helen Pearson, « Drug discovery: In the eye of the beholder, » *Nature online*, 29 août 2003, http://www.nature.com/news/2003/030825/full/030825-5.html (consulté le 2 août 2006).

3 BBC, « *Smart drugs* boost pilot memory », lundi 8 juillet 2002. En ligne :http://news.bbc.co.uk/2/hi/health/2116476.stm (consulté le 31 juillet 2006).

4 Anon., « Supercharging the brain », *The Economist*, 16 septembre 2004.

5 Voir le communiqué de presse de Sound Pharmaceuticals, « New Drug for Hearing Loss Enters Clinical Testing », 12 juin 2006. En ligne : http://www.soundpharmaceuticals.com/news.html (consulté le 4 août 2006).

6 http://www.cyberkineticsinc.com/content/medicalproducts/braingate.jsp

7 http://www.idiap.ch/current_projects.php?project=27

8 Jo Revill, « Mind power allows disabled to take a virtual stroll », *The Observer*, 2 juillet, 2006. En ligne : http://observer.guardian.co.uk/uk_news/story/0,,1810779,00.html.

9 http://www.bernstein-zentren.de/en/259.php.

10 Yuri Kageyama, « Remote Control Device 'Controls' Humans », *Associated Press*, 26 octobre 2005. En ligne : http://www.sfgate.com/cgi-bin/article.cgi?f=/n/a/2005/10/25/financial/f133702D73.DTL

11 Lakshmi Sandhana, « This is a computer on your brain », *Wired online*, 12 juillet 2006. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/medtech/0,71364-0.html.

12 Simon Collins, « Couples' nervous system linked by implants in limbs », *New Zealand Herald*, 7 juin 2004. En ligne : http://www.nzherald.co.nz/category/story.cfm?c_id=55&objectid=3576668 (consulté le 4 août 2006).

13 Michael Chorost, « My Bionic Quest for *Boléro », Wired*, novembre 2005. En ligne : http://www.wired.com/wired/archive/13.11/bolero.html.

14 Robert S. Boyd, « Scientists race to create bionic arm: Federal government wants better prostheses for wounded soldiers », *Knight Ridder*, 29 mai 2006. En ligne : http://www.charlotte.com/mld/charlotte/news/14691684.htm

15 Alex Ignatiev *et al.*, « Bionic Eyes – Ceramic Microdetectors That May Cure Blindness » http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1544 (Source : *Materials World*, vol. 10, no 7, pp. 31-32, juillet 2002). Vincent Landon, « Bionic eye offers new window on the world », *Swiss Info*, 5 novembre 2003, en ligne : http://www.swissinfo.org/sen/Swissinfo.html?siteSect=511&sid=4415302 (consulté le3 août 2006). Site Web de VisionCare Ophthalmic Technologies : http://www.visioncareinc.net/homepage.html. Voir aussi Cyrus Farivar, « Jeepers Creepers, Bionic Peepers », *Wired*, 5 mai 2005. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/medtech/0,67429-0.html (consulté le 3 août, 2006).

16 Katherine Bourzac, « This Is Your Brain on Nanotubes », *Technology Review*, 19 mai 2006. En ligne : http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=16895&ch=nanotech&sc=&pg=1.

17 Andrew Rimas, « He can build them better, faster, sexier », *Boston Globe*, 12 juin 2006. En ligne : http://www.boston.com/news/globe/health_science/articles/2006/06/12/he_can_build_them_better_faster_sexier/ (consulté le 3 août 2006); site Web d'Ossur : http://www.ossur.com/template110.asp?PageID=1780.

18 *Associated Press*, « Europe Has the Hot Hand », 3 décembre 2005. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/medtech/0,69749-0.html (consulté le 4 août 2006).

19 Kevin Bullis, « Brain-Healing Nanotechnology », *Technology Review*, 14 mars 2006. En ligne : http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=16591&ch=nanotech//.

20 Gretchen Cuda, « Building Better Bones With Ice », *Wired*, 14 mars 2006. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/medtech/0,70371-0.html (consulté le 3 août 2006).

21 Helen Phillips, « Brain prosthesis passes live tissue test », 25 octobre 2004, *New Scientist,* en ligne : http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn6574 (consulté le 3 août 2006); voir aussi Lakshmi Sandhana, « Chips Coming To A Brain Near You », *Wired News*, 22 octobre 004. En ligne : http://www.wired.com/news/medtech/0,1286,65422,00.html.

22 Peggy Peck, « Doctor's specialty is re-wiring brain », *MedPageToday.com*, 22 mars 2006. En ligne : http://www.cnn.com/2006/HEALTH/03/21/profile.rezai/index.html. Voir aussi http://www.stjosephs-stpaul.org/CareService/6_Other_Services/3_Deep_Brain_Stimulation/index.cfm.

23 Kevin Bullis, « Nanowires in the brain making brain implants safer, cheaper », *Technology Review*, 11 juillet 2006. En ligne : http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=17071&ch=nanotech.

24 Communiqué de presse de Cyberonics, Inc., « FDA Approves Cyberonics' VNS Therapy System for Treatment-Resistant Depression (TRD) », 15 juillet 2006. En ligne : http://www.cyberonics.com/PressRelease_detail.asp?ID=F5FBFBC8-1998-46D3-A234-53A960853081. Voir aussi Benedict Carey, « F.D.A. Considers Implant Device for Depression », *New York Times*, 21 mai 2005, en ligne : http://www.wireheading.com/vagus-stimulator/index.html (consulté le 4 août 2006).

25 Rouiller Eric M., « Anti-Nogo-A treatment enhances corticospinal tract sprouting and functional recovery after unilateral cervical lesion in adult primates », *Nature Protocols*, DOI: 10.1038/nprot.2006.190. En ligne : http://www.natureprotocols.com/2006/07/21/antinogoa_treatment_enhances_c.php.

26 Simon Bradley, « Swiss make breakthrough in spinal research », *Swiss info*, 7 juillet. En ligne : http://www.nzz.ch/2006/07/07/eng/article6876510.html (consulté le 4 août 2006).

27 Ian Johnston, « GM spray could keep dentist at bay », *The Scotsman* online, 8 juillet 2006. En ligne : http://news.scotsman.com/scitech.cfm?id=996272006.

28 Communiqué de presse de la NASA, « NASA develops system to computerize silent, 'subvocal' speech », 17 mars 2004. En ligne : http://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2004/04_18AR.html. Voir aussi David Armstrong, « The Silent Speaker », *Forbes Online*, 10 avril 2006 : http://www.forbes.com/free_forbes/2006/0410/084.html.

29 Richard Waters, « US group implants electronic tags in workers », *Financial Times*, 12 février 2006. En ligne : http://www.ft.com/cms/s/ec414700-9bf4-11da-8baa-0000779e2340,s01=1.html (consulté le 4 août 2006).

30 Quinn Norton, « A Sixth Sense for a Wired World », *Wired*, 7 juin 2006. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/0,71087-0.html?tw=wn_index_1 (consulté le 4 août 2006).

31 Sam Jaffe, « Super Vision Sans Bionics », *Wired*, 8 février 2006. En ligne : http://www.wired.com/news/technology/0,70181-0.html.

32 Chris Williams, « Canadians go ultrasonic for tooth regrowth implant », *The Register* (UK), 29 juin 2006. En ligne : http://www.theregister.co.uk/2006/06/29/ultrasound_tooth_implant/ (consulté le 4 août 2006).

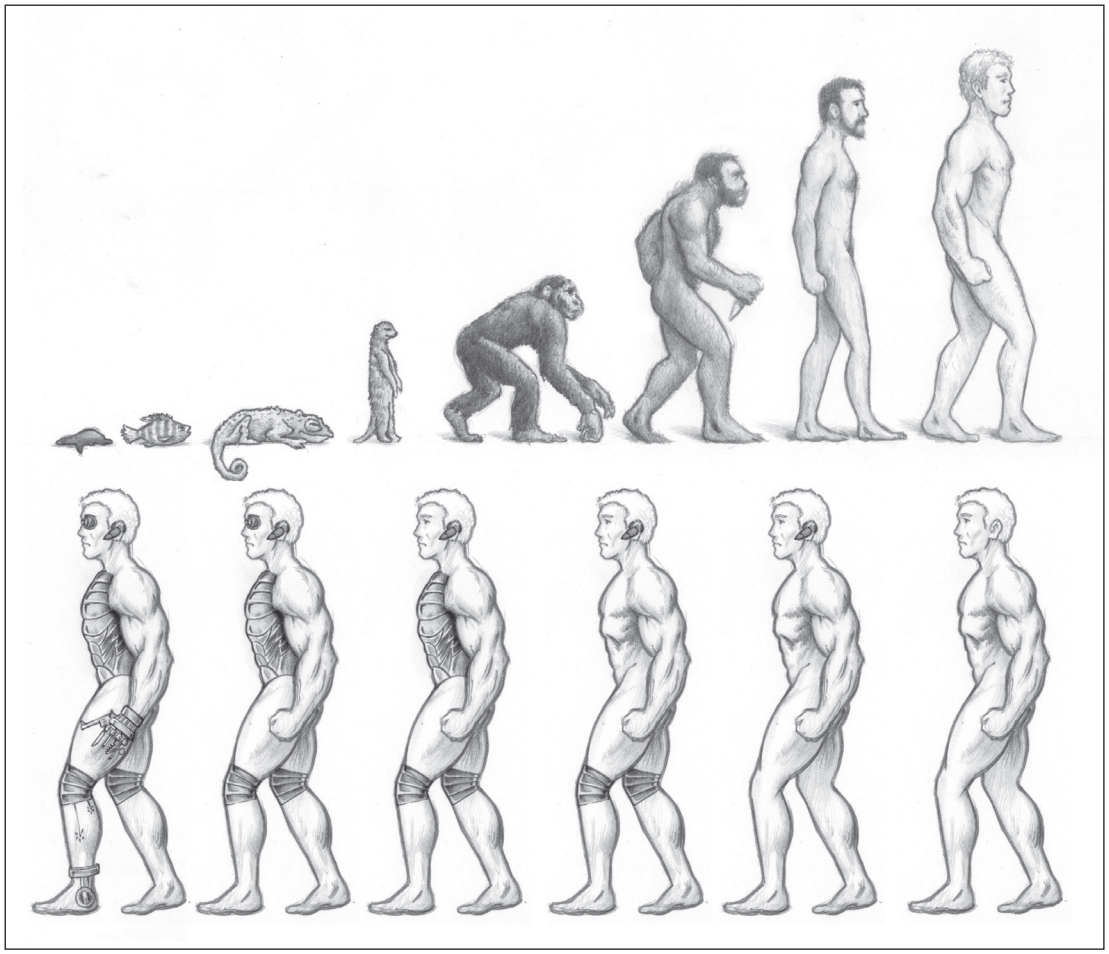
33 John Boy, « Bionic suit offers wearers super-strength », *New Scientist*, 9 avril 2005. En ligne : http://www.newscientist.com/article.ns?id=mg18624945.800. Voir aussi le site Web de l'Université de Tsukuba : http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/HAL/indexE.html.

34 Voir le site Web de Berkeley Robotics and Human Engineering Lab : http://bleex.me.berkeley.edu/bleex.htm.

35 Mis sur pied en 2003 par la Fondation Gates, le partenariat des Grands défis en santé mondiale inclut maintenant le Wellcome Trust, les Instituts de recherche en santé du Canada et la Foundation for the National Institutes of Health (É.-U.). En juin 2005, le projet a accordé 43 subventions totalisant 436,6 millions $ pour relever 14 défis en santé mondiale :

Améliorer les vaccins destinés aux enfants
Grand défi no1 : Créer des vaccins unidose efficaces
Grand défi no 2 : Préparer des vaccins n'exigeant pas de réfrigération
Grand défi no 3 : Mettre au point des systèmes d'administration des vaccins sans aiguille
Créer de nouveaux vaccins
Grand défi no 4 : Imaginer des systèmes de tests pour les nouveaux vaccins
Grand défi no 5 : Concevoir des antigènes pour l'immunité de protection
Grand défi no 6 : Développer les connaissances sur les réactions immunologiques
Contrôler les insectes qui transmettent des agents pathogènes
Grand défi no 7 : Élaborer une stratégie génétique pour le contrôle des insectes
Grand défi no 8 : Élaborer une stratégie chimique pour le contrôle des insectes
Améliorer la nutrition pour favoriser la santé
Grand défi no 9 : Créer une espèce enrichie d'une culture de base
Améliorer le traitement médicamenteux des maladies infectieuses
Grand défi no 10 : Trouver des médicaments et des systèmes d'administration qui limitent la résistance aux médicaments
Guérir l'infection latente et chronique
Grand défi no 11 : Créer des thérapies qui peuvent guérir l'infection latente
Grand défi no 12 : Créer des méthodes immunologiques pour guérir l'infection latente
Mesurer l'état de santé de manière exacte et économique dans les pays en développement
Grand défi no 13: Mettre au point des technologies pour évaluer la santé de la population
Grand défi no 14: Mettre au point des outils diagnostiques polyvalents

36 Nous n'avons pu trouver l'information financière relative au programme *Faire reculer le paludisme* sur son site Web, http://www.rbm.who.int/index.html. Les sommes approximatives sont tirées du Human Development Report Office, « Fund Profiles: Global Fund, GAVI, Fast Track Initiative, and Roll Back Malaria », Development Initiatives, document hors-série 2005, p. 6.



www.etcgroup.org