

*L e s R e n d e z - v o u s
d e s A n n a l e s d e s M i n e s*

25 mars 2004

**Les nanotechnologies :
rêve ou cauchemar ?**

Avec la participation de

Gilles Le Marois

*Chargé de mission à la Direction générale de l'Industrie,
des Technologies de l'information et des Postes (DIGITIP)*

Louis Laurent

*Directeur du Département de recherche sur l'Etat condensé, les atomes et les
molécules (CEA)*

Françoise Roure

*Docteur d'Etat, Inspectrice générale au Conseil général des technologies
et de l'information (CGTI)*

Jean-Pierre Dupuy

Directeur du CREA (Ecole Polytechnique)

Débat animé par

Thierry Gaudin

Ingénieur général des Mines, président de Prospective 2100

Gilles Le Marois

Depuis une vingtaine d'années, des progrès significatifs ont été observés en sciences et technologies à l'échelle nanométrique. Sont apparus des outils pour voir et pour travailler à l'échelle de l'atome, dont le microscope à « effet tunnel ». Le principe consiste en une pointe très effilée montée sur des capteurs piézoélectriques. Lorsqu'on approche cette pointe de l'échantillon, naît un courant par effet tunnel, courant dont l'intensité est particulièrement sensible à la distance entre la pointe et la surface. Le contrôle de ce courant et un balayage latéral permettent une cartographie très précise de la structure superficielle de l'échantillon.

On peut également, en polarisant la pointe, extraire des atomes et les déplacer, réaliser des dessins et des gravures. On utilise la photolithographie pour graver

aujourd'hui à 90 nm, voire 45 nm. Au-delà, cela nécessitera de nouvelles technologies, extrême UV, lentille en immersion, faisceau d'électrons...

La recherche dans ce domaine associe de plus en plus la chimie, la physique et la biologie. C'est à partir de la convergence de ces sciences que naîtront les ruptures technologiques de demain.

Les progrès reposent également sur la maîtrise de nano-objets, sur la capacité à produire, à assembler, voire à auto-assembler ces objets. Emblématiques de ces objets, les nanotubes de carbone présentent des propriétés exceptionnelles : des propriétés mécaniques qu'on utilise pour le renfort de matériaux composites, des propriétés électroniques comme émetteurs d'électrons pour des afficheurs mais également pour la réalisation de transistors ; des propriétés piézoélectriques pour la réalisation de toutes sortes d'actionneurs, également pour la réalisation d'un moteur moléculaire, des propriétés de chimie organique, comme des catalyseurs, des architectures nanométriques.

Pour atteindre les promesses de ce nanomonde, on poursuit deux approches :

- Une première approche, dite descendante, qui consiste à miniaturiser, on réalise des objets ou des motifs de plus en plus fins. La microélectronique et sa fameuse *roadmap* visent, en diminuant la finesse de gravure, à doubler le nombre de transistors tous les 18 mois.
- Une deuxième approche, opposée, dite ascendante, réalise ces composants par assemblage auto-organisé à partir d'atomes et de molécules.

Ces deux approches ont tendance de plus en plus à se compléter. J'ai choisi pour l'illustrer trois secteurs clés : l'environnement, la santé et l'information et la communication.

- ***L'environnement.*** La voiture de demain utilisera des nanostructures poreuses et des catalyseurs pour piéger et traiter les polluants ; des revêtements multicouches autolubrifiants pour diminuer les frictions et remplacer l'huile et la graisse ; des composites à base de nanotubes de carbone pour renforcer et alléger la carrosserie ; des revêtements minces pour vitrage athermique de façon à maintenir une température constante dans l'habitacle ; des céramiques à haute ténacité, pour réaliser des moteurs à haut rendement et très compacts ; enfin, des charges incluses dans les pneus pour limiter l'usure et le bruit de roulement.
- ***La santé.*** Les puces à ADN pour l'analyse de l'expression des gènes et la détection d'anomalies génétiques. Le laboratoire sur puces, permet de réaliser à moindre coût et dans un temps record toute une série d'analyses

très complexes, et qui permet également d'envisager à terme le diagnostic et le traitement quasi simultanés.

Dans le domaine des thérapies, l'usage de nanoparticules permettra le ciblage intracellulaire, notamment dans le traitement du sida et du cancer. Des nanoparticules métalliques vectorisées viendront se fixer sur la cellule malade et, par un rayonnement infrarouge, chauffer et détruire la cellule.

- ***L'information et la communication.*** En électronique, en termes de miniaturisation, on arrive à des limites, du fait de l'apparition de perturbations quantiques à ces échelles. Plutôt que de subir ces perturbations, on espère les utiliser en imaginant des concepts très novateurs comme le transistor 1 électron.

Certaines molécules présentent des états électroniques multiples qu'on peut utiliser pour coder de l'information. Ces molécules ont des capacités d'auto-organisation, d'auto-assemblage pour réaliser des architectures 3D. On voit très bien le potentiel énorme que possède cette filière moléculaire dans le domaine du traitement et du stockage de données.

Mais le vecteur idéal, c'est peut-être le photon. Pas de masse, donc pas de dissipation d'énergie. Des nanocristaux de semiconducteurs peuvent produire moduler et analyser la lumière, guidée à l'aide des miroirs parfaits que sont les cristaux photoniques.

Plus encore novateur dans le domaine du traitement des données, le processeur quantique. Un processeur élémentaire a déjà été réalisé, par le CEA, au DRECAM.

Ces progrès nécessitent de développer des compétences pluridisciplinaires, ce qui pourrait avoir un impact important sur notre système éducatif, sur notre façon de travailler, sur notre organisation du travail.

Louis Laurent

On appelle nanosciences le résultat de la convergence physique, chimie et biologie autour de l'échelle de quelques atomes ; au sens large, cela englobe souvent de fait des objets micrométriques parce que, très souvent, les objets nanométriques sont associés avec des objets plus grands. Une autre convergence est celle des technologies. On a inventé le transistor dans les années 50, le circuit intégré s'est développé dans les années 60, puis, pour faire du calcul, on a fait des microprocesseurs.

On a ensuite étendu ce savoir faire à d'autres domaines, d'où la microfluidique, la micromécanique... A l'échelle micrométrique, on manipule désormais de l'information que des liquides ou des systèmes mécaniques.

Au début des années 2000, on se dirige allègrement vers le milliard d'opérations par seconde sur un microprocesseur qui contient des centaines de millions de transistors. De bons auteurs prédisent que, si la progression actuelle se poursuit entre les années 2020-2030, on aura pour 1000 euros une machine qui aura la puissance de calcul proche de celle qu'on prête au cerveau humain (valeurs à prendre avec précaution, le cerveau fonctionnant sur un principe différent). Je n'ai pas dit qu'elle pensera... En fait la progression ne peut se faire raisonnablement que jusque vers 2015. On tangentera alors les 20 nm, environ 60 atomes et environ 10 milliards de transistors par circuit. Aller au-delà avec les techniques actuelles pose des problèmes qui semblent difficilement surmontables (thermique, connexions, effets quantiques dont le courant de fuite).

Une piste pour miniaturiser encore plus les composants est «l'électronique moléculaire». On peut par exemple utiliser des nanotubes de carbone en guise de transistor ou de connexion. D'autres envisagent d'utiliser ; des molécules plus complexes, synthétisées sur mesure, pour faire du calcul.

L'avenir des nanotechnologies réside peut-être dans les microtechnologies en volume ! Un neurone du cerveau c'est assez gros mais, comme les neurones sont assemblés en volume plutôt qu'en surface, il y en a beaucoup (50.000 par millimètre cube, chacune communiquant avec les autres au travers de l'ordre de 10.000 synapses). Un litre de composants rangés ainsi constituerait une machine potentiellement très puissante. Comme on ne saura pas fabriquer cela, ce qui demanderait d'assembler des centaines de milliards d'éléments et de réaliser 10.000 fois plus de connexion, il faudra recourir à l'auto-assemblage puis l'auto configuration. Il s'agit de recherche à long terme. Il existe de fait déjà une forte activité dans le domaine de l'auto-assemblage avec des méthodes d'ailleurs parfois empruntées à la biologie (ADN qui pourrait contenir un « code d'assemblage », voire l'utilisation de phages que l'on peut faire évoluer pour réaliser des opérations sélectives).

Parlons maintenant des nanomatériaux . On essaie d'en faire sur mesure, par exemple plus résistants, ou ayant de nouvelles propriétés optiques. Peut-être, un jour, les matériaux imputrescibles seront-ils jugés comme malvenus parce qu'on voudra, dans le cadre d'un développement durable, avoir des matériaux qui disparaissent, qui soient digérés par l'environnement et, au contraire,

fabriquera t-on sur mesure des matériaux qui auront le bon goût d'être putrescibles.

Beaucoup plus sophistiqués sont les « matériaux système », intermédiaires entre les matériaux et les composants. On peut penser à un matériaux qui contient des réseaux de transfert d'information, d'énergie ou de fluides à l'instar par exemple de ce que fait le vivant. Hors nanotechnologie, on peut penser, par exemple, à un béton de structure, qui contiendrait de nombreux capteurs et serait capable de « souffrir » et de l'exprimer lorsqu'un bâtiment va s'écrouler. On peut imaginer aussi des dispositifs d'affichages.

Autre exemple, la conversion d'énergie. Les cellules photovoltaïques, la photosynthèse font appel à des processus qui se déroulent sur des échelles de longueur nanométrique. Voici une cellule Grätzel pour le photovoltaïque. Ce sont des molécules de colorant greffées sur des nanobilles de titane et placées entre des électrodes ; cela simule la photosynthèse, capte le rayonnement solaire et produit de l'électricité. Ça date des années 90. En 1998, on a réussi à faire un « chloroplaste » artificiel, un système qui piège des molécules de colorant, qui, comme la chlorophylle, lorsqu'elles sont éclairées, produisent un transfert de charge électrique qui accumule des protons au centre de la goutte. La protéine rouge, ici, est une ATP-synthase, carburant qui est utilisé par exemple dans les plantes pour faire du glucose. La difficulté est d'orienter des petites choses en 3D. On sait très bien faire des choses à plat, mais en volume on ne sait pas encore. N'imites pas la nature qui veut.

En nanomédecine, comme on l'a dit, les nanotechnologies sont très utilisées pour toutes sortes d'analyses, par exemple le Food expert. C'est une biopuce qui permet d'analyser toutes les viandes qui se trouvent dans un steak haché. On peut imaginer des systèmes de ce type pour identifier des virus, des agents pathogènes... Ça va sans doute exploser dans les décennies à venir.

Le plus ambitieux, qui correspond déjà à des programmes en Europe, au Japon et aux Etats-Unis, sera d'interfacer les nanosciences avec le vivant.

Par exemple, un morceau de rétine artificielle transforme la lumière en courant électrique. Greffé sur une rétine malade, cela permettra peut-être à certains malades d'augmenter leur capacité à voir. Ce dispositif ne se branche pas sur le système nerveux, ça réveille les cellules malades de la rétine.

Autre exemple qui date des années 90, l'interfaçage de neurones avec le silicium. Cela vient d'Allemagne. On est capable de les exciter à partir de circuits électroniques. Il y a des projets pour faire pousser des cultures de

neurones sur une puce électronique dans le but de réaliser un ensemble qui piloterait un petit robot.

Quelque chose qui va révolutionner notre avenir, c'est l'informatique ubiquitaire. Aujourd'hui il y a déjà beaucoup d'ordinateurs sont tous intégrés dans les objets. Dans votre voiture, votre téléphone, les appareils électroménagers... Vous ne savez plus combien vous en avez. En même temps, on assiste l'avènement des systèmes sans fil, communicants, et leur possible intégration grâce aux microtechnologies et nanotechnologies, dans de petits objets. Vous avez ici ce qu'on appelle un RFID (Radio Frequency Identification). Lorsqu'il reçoit une impulsion électromagnétique, il en extrait l'énergie et émet une réponse à son tour. C'est comme un code barre électromagnétique qui serait intégré dans des objets.

A plus long terme, la recherche va s'attaquer à la complexité. Référence est souvent fait à deux systèmes naturels complexes : le cerveau et la cellule E. Drexler par exemple a développé en 1986 l'idée qu'avec les nanotechnologies, on pourrait fabriquer des petits robots qui se dupliqueraient eux-mêmes, ce qui reviendrait à synthétiser une forme de vie artificielle dans le but, par exemple, de réparer les organes malades. La faisabilité est controversée : une cellule vivante, on ne sait pas la faire sur plan. La nature utilise d'autres méthodes d'invention et de fabrication : l'évolution, la programmation génétique, les méthodes d'essai-erreur et ce, à l'échelle d'une planète et sur des millions d'années.

Il y a toutefois des idées pour ne pas partir de rien mais de se servir de ce que fait la nature : je citerai un projet qu'on appelle l'organisme minimal. On réduit le génome d'une bactérie choisie parmi les plus simples pour voir avec combien de gènes elle peut encore survivre. Il y a également des projets de fabriquer des organismes « synthétiques ». Par exemple, pour faire des bactéries capables de séquestrer le carbone. Il y également beaucoup de travaux sur l'interface neurones/électronique. En fait, la biotechnologie et les nanosciences font un tout, la biotechnologie apportant la dimension du complexe.

Les nanosciences sont un phénomène réel mais il y des choses qui seront faisables et d'autres qui ne le seront jamais. On se doit de séparer les idées en cours en deux catégories :

- Celles qui, à court terme et avec le budget adéquat, peuvent faire l'objet d'un projet qui permet raisonnablement d'arriver à une partie importante des promesses faites. Dans cette catégorie on peut ranger les dix prochaines années de la micro (désormais nano) électronique, certains

matériaux, des applications en « nanomédecine ». Ce domaine est foisonnant. Il y a aussi des applications « anecdotiques ». Par exemple, on vous vend des nanoparticules d'argent pour faire des semelles de basket anti-odeur ou des tissus anti-taches.

Celles qui sont du domaine de l'exploration. Cela recouvre en particulier tout ce qui concerne la relation à la complexité. Il convient de raisonner en termes d'avancée de l'ensemble des connaissances scientifiques plutôt que de projet. Un point que je n'ai pas abordé volontairement puisqu'il doit être traité par un autre orateur, ce sont toutes les questions que peuvent susciter de tels développements s'ils voient le jour : pour n'en citer que deux : les nanorobots (heureusement très improbables) tels que décrits par Drexler et aussi le fait qu'on puisse interfacer le cerveau et plus généralement l'humain avec l'électronique. Que se passera-t-il, du point de vue éthique, quand il sera possible d'améliorer l'être humain ? La rétine dont je vous ai parlé tout à l'heure, si elle marche dans l'infrarouge, cela permet de voir la nuit, par exemple.

Un autre point notable est le fait que ces recherches sont à l'interface de plusieurs disciplines. Aux Etats-Unis, on envisage de faire des cursus avec un double doctorat.

DEBAT

1^{ère} question de la salle

J'ai une question très simple : est-ce une recherche coûteuse, comparé par exemple à l'accélération de particules de la physique lourde, ou bien à des calculs mathématiques où suffisent le papier et le crayon. Dans quels domaines se situent les coûts de cette recherche ? Est-ce abordable pour un pays pauvre ?

Gilles Le Marois

Les nanotechnologies couvrent des domaines extrêmement vastes. Renault avait décidé d'utiliser, pour renforcer certaines pièces de ses carrosseries, des nanotubes de carbone. Mais cela coûtait un euro de plus par pièce, donc ils ont arrêté la production avec les nanotubes de carbone.

Cela va dépendre essentiellement des développements du marché. Ce coût va devenir de plus en plus abordable au fur et à mesure que les marchés vont se développer. Le premier PVC qui a été produit valait plus cher que le platine. Le PVC est un produit extrêmement courant aujourd'hui.

Louis Laurent

Dans cette recherche, il y a un vaste front de chercheurs impliqués. Les partenaires principaux sont le Japon et les Etats-Unis.

Ces recherches demandent un changement d'organisation. Il y en a qui ne coûtent presque rien, mais une autre partie demande des moyens assez lourds. On les a mutualisées autour de quatre centrales technologiques : le LETI à Grenoble, le LAAS à Toulouse, l'IEF/LPN en région parisienne, l'IEMN à Lille. Ramené au niveau du chercheur, ça n'est pas exorbitant. En France on dépense environ 3 euros par habitant dans ce secteur de recherche.

Pour un Etat, ça coûte cher. Parce qu'il faut beaucoup de chercheurs, une infrastructure universitaire et industrielle, parce que c'est une recherche mi-fondamentale, mi-industrielle.

2^{ème} question de la salle

J'entends beaucoup de choses avec lesquelles je ne suis pas d'accord. On a dit qu'on ne savait pas prévoir au-delà de 2010. Au contraire, la feuille de route est assez bien définie jusqu'en 2019. L'électronique moléculaire, on en cause depuis trente ans, on n'a jamais vu un transistor moléculaire fonctionner... Je parle d'un transistor à la molécule unique.

Ensuite, sur le coût de la recherche, il y a des outils qui ne coûtent pas cher : le microscope à effet tunnel qui permet de voir à l'atome près. Un outil de synthèse de nanotubes, cela ne coûte pas cher. Quant à l'organisation de la recherche sur les nanotechnologies en France, effectivement on a fait des choix, sans du tout se donner les moyens d'évaluer la qualité des choix qu'on faisait. Certains peuvent se réjouir que ces choix-là aient été faits en France mais il y en a d'autres qui ne sont peut-être pas très heureux de cette nouvelle organisation « à la française », unique dans le monde.

Louis Laurent

M. Weisbuch a parfaitement raison. J'ai fait un schéma par tranches de 20 ans mais il y a une roadmap au-delà. Il y a une limite vers les 20 nm, on travaille nous-mêmes dans la lithographie extrême UV... L'électronique moléculaire n'est pas la panacée mais il existe des transistors moléculaires à base de nanotubes. Il y a plusieurs laboratoires qui ont fait ça dans le monde, qui ont des performances proches du CMOS. Par contre, on ne saurait pas les industrialiser. J'ai essayé de montrer les pistes possibles mais j'ai mis des points d'interrogation.

L'électronique moléculaire à haute densité se heurte à deux problèmes qui sont la dissipation de puissance – il faut investir un certain nombre de joules chaque fois qu'on fait une opération – et les connexions. Cela ne sert à rien de mettre des milliards de transistors si on ne peut plus mettre les fils.

Il y a une voie de calcul en volume – j'ai dit que les microtechnologies sont peut-être l'avenir des nanotechnologies. La différence, c'est l'organisation en 3D et non plus en feuillette... Il y a 100 milliards de neurones dans le cerveau. Si vous essayez de les disposer sur une puce de 1 cm², ça fera une forte densité d'intégration.

Gilles Le Marois

La photonique permet justement de s'affranchir d'une partie des problèmes d'échauffement.

3^{ème} question de la salle

On parle de brevetabilité du logiciel, de brevetabilité du vivant. Est-ce que vous pourriez nous éclairer sur les enjeux de la propriété intellectuelle ?

Louis Laurent

Les brevets, c'est une bataille importante. Beaucoup de laboratoires, y compris le mien, en déposent. Le bit quantique que vous a montré M. Le Marois fait l'objet d'un dépôt de brevet. Il y a également des procédés de fabrication à l'échelle moléculaire.

Les brevets sont importants mais les publications aussi, c'est un équilibre difficile. Un bon laboratoire sait faire les deux. Aux Etats-Unis, on peut publier avant de breveter. En France, il faut d'abord breveter et publier après.

Thierry Gaudin

A Christine Peterson, la grande propagandiste du Foresight Institute qui défend la cause des nanotechnologies aux Etats-Unis, on a demandé si, à partir des nanotechnologies, on pourrait faire comme à partir des microtechnologies, créer des entreprises dans son garage. La réponse, c'était plutôt non. Parce que l'appareillage nano nécessite des choses assez importantes en coût, en poids, etc. Mais, à vrai dire, fabriquer des microcircuits, c'était déjà très coûteux pour l'époque et ça n'a pas empêché certaines entreprises utilisatrices de démarrer dans des conditions tout à fait élémentaires.

Louis Laurent

Tout est possible. Cela dépend de ce que vous voulez vendre. Avec deux produits chimiques, vous faites un précipité qui a la taille nanométrique. Pour un euro, vous pouvez faire des objets nanométriques chez vous, dans votre garage. Ce qui va compter, c'est plutôt l'aspect innovation, la protection de ce que vous faites. Il y a une barrière à l'entrée, il faut que cela soit breveté mais il y a des productions d'objets nanométriques maintenant, des nanotubes de carbone, qui ne demandent pas des investissements considérables.

A l'autre opposé, en microélectronique, vous pouvez imaginer d'intégrer des nanotubes de carbone sur des wafers de silicium. Là, par contre, le droit à l'entrée, ça échappe à une start-up. La gamme est étendue.

4^{ème} question de la salle

Est-ce que vous pouvez nous donner quelques renseignements sur la conception, la réalisation et, éventuellement, les applications des « moteurs moléculaires » ?

Louis Laurent

On sait fixer une petite ailette métallique sur un nanotube de carbone pour faire un palier sans frottement. Ça a été fait à Berkeley puis, juste après, à l'ENS Paris. Une autre voie est d'utiliser l'ATP-synthase qui est une protéine capable de tourner et de faire un moteur moléculaire. Il y a des recherches mais, à ma connaissance, pas encore d'application des moteurs nanométriques.

5^{ème} question de la salle

Quelles sont les formations pour des jeunes qui ont entre 25 et 30 ans qui vont les amener vers ce domaine des nanotechnologies et également vers les industries concernées ?

Gilles Le Marois

Voyez dans *Réalités Industrielles* l'article de R. Monk, G. Popovic et Renzo Tomellini de la *DG Recherche, Commission européenne*. Il montre combien notre système éducatif est peu adapté à cette révolution.

6^{ème} question de la salle

Les « applications anecdotiques », « anti-odeur » ou « anti-salissures », peuvent certes prêter à sourire. Mais cela peut déboucher sur de nouveaux matériaux, plastiques pour l'automobile, ou caoutchoucs, pour les pneus. Les

nanotechnologies ne se limitent pas aux développements de microprocesseurs extrêmement performants.

Gilles Le Marois

La DIGITIP a lancé une étude sur les enjeux et perspectives des nanomatériaux. Il y aura le 17 juin (2004 Ndlr), chez Rhodia, un séminaire de restitution de cette étude.

7^{ème} question de la salle

Dès aujourd'hui, on utilise des revêtements de nanopoudre pour des fonctions antibuée, ce qui permet d'avoir cette fonction dans la structure même du matériau. A un congrès de plasturgie hier, j'ai pu constater que l'industrie allemande s'est structurée pour explorer les potentialités de ce domaine. Y a-t-il en France des programmes exploratoires ?

Gilles Le Marois

Je vous renvoie à l'article de *Réalités Industrielles* que j'ai signé avec Ivan Faucheu et Philippe Parmentier, sur les différentes initiatives publiques dans ce domaine, dans les domaines des matériaux, des biotechnologies et des TIC.

Françoise Roure

Je commence par deux précisions.

La première concerne l'investissement nécessaire pour se lancer dans un double doctorat. L'évaluation de Philip Bond, responsable des nouvelles technologies au Département du Commerce américain, est d'un million de dollars. Il vaut mieux investir dans la formation d'équipes pluridisciplinaires.

La deuxième concerne les brevets. Dans mon article de *Réalités industrielles*, je montre qu'il y a une croissance exponentielle du nombre de dépôts mais la classification utilisée n'est pas homogène.

Appliquer la science fondamentale à l'échelle nanométrique, c'est soit aller trop vite – soit se positionner par rapport à des phénomènes qui se développent déjà dans les laboratoires et dans les implantations industrielles. Ni en retard ou ni en avance, au temps présent, que peut-on dire aujourd'hui ?

Je structurerai cette présentation en trois points : un, les réalités économiques, industrielles et juridiques ; deux, les problèmes de normes, de normalisation et de brevets et ceux de l'évaluation des risques liés à la production à l'échelle

nanométrique, dans les laboratoires et dans les usines ; enfin trois, une esquisse d'agenda multilatéral institutionnel dans le domaine des nanotechnologies.

L'effort public de recherche dans le domaine des nanotechnologies crée un marché. De façon très schématique, un milliard de dollars par an aux Etats-Unis, un milliard de dollars par an dans la sphère européenne, un milliard de dollars par an en Asie, à quoi s'ajoute un autre milliard de dollars d'investissements privés, majoritairement de la sphère américaine. Cela fait un marché de 4 milliards de dollars par an de dépense pour les labos de recherche publics et privés. Le marché B to B va aussi se développer, de même que le marché de l'achat public, en particulier pour la défense et la sécurité intérieure, priorités des financiers d'outre-Atlantique.

Des fondations, petites ou grandes, s'intéressent à la convergence à l'échelle nanométrique de diverses sciences – chimie, textile, cosmétique, tabac, technologies de l'information, biotechnologies, aérospatial, énergie, santé...

Ces équipements de recherche appliquée et de production requièrent des masses financières considérables. Des consortiums *ad hoc* se créent pour financer de façon mutualisée les applications de la recherche fondamentale à l'échelle nanométrique. La fourchette d'estimation sur les prochaines années serait entre 2 et 5 milliards de dollars l'unité de production de micro-nanoélectronique. C'est une très forte barrière capitalistique à l'entrée.

Autre volet très différent : les problèmes juridiques. En termes d'hygiène et de sécurité, il y a les problèmes liés à la toxicité éventuelle des nanoparticules. Il y a aussi possibilité de conflit entre la propriété intellectuelle, les droits d'auteur et le secret défense. Les chercheurs américains sont confrontés à une éventuelle interdiction de publier sur leurs avancées, ce qui pose le problème du partage de la connaissance au plan international.

Ensuite, pour les aspects douaniers, on a bien vu les problèmes de moratoire avec les OGM. On pourrait imaginer, pour un produit intermédiaire qui comporterait des nano-éléments –, que les aspects conflits en termes de commerce extérieur, de commerce international, pourraient être portés et émerger via les problèmes douaniers.

Enfin l'Éthique. Le Comité d'éthique de l'Union européenne a inscrit à son programme 2004 la recherche des principes directeurs à appliquer aux nanotechnologies, comme elle l'avait fait pour les cellules souches.

Dernier point : la création d'une « Converging Technologies Bar Association », créée à New York par des juristes mais ouverte à des économistes, des scientifiques, des commerçants. C'est une initiative qui rentre dans le cadre de

la convergence. En matière de brevets, il y a des références dans l'article. La mise en cohérence des classifications dans ce domaine est en cours.

Sur l'évaluation des risques, l'agenda européen se met en place. Au début de mars 2004, une réunion a eu lieu à l'initiative de la Direction générale Santé et Consommateurs pour évaluer les effets de la production de nanoparticules et de nanostructures, sur l'environnement et sur le corps humain. Plus petite est la particule, plus il y a de risques de dissémination des nanoparticules dans l'organisme, d'où un gros effort de recherche.

Dernier point, la convergence NBIC. Jean-Pierre Dupuy en parlera.

Les nanotechnologies représentent des enjeux majeurs de compétitivité économique. La course aux brevets et standards mondiaux est déjà entamée. Il y a par ailleurs un volet militaire « sûreté-sécurité », par exemple, le durcissement de l'acier ou l'utilisation de nanostructures de carbone dans les masques à gaz... Il y a aussi des espoirs forts pour la lutte contre le cancer.

Mais il y a des inquiétudes qui m'amènent à préconiser un dialogue multilatéral aussitôt que possible et pour lequel la France et l'Union européenne soient aussi armées que possible. Je propose nous nous structurions collectivement pour mieux observer et comprendre et pour mieux anticiper. C'est une question de gouvernance publique qui est complètement légitime.

En résumé :

- Il y a une approche multifacettes des nanotechnologies, ce n'est plus seulement un sujet scientifique, qu'on le veuille ou non.
- Et il y a un agenda international institutionnel. Il faut que nous y prenions notre place et notre rang. Pour cela, il faut commencer à se doter des outils d'observation, de compréhension et d'anticipation.

Jean-Pierre Dupuy

Le titre de cette soirée est « Les nanotechnologies : rêve ou cauchemar ? » On pourrait s'attendre, après avoir entendu parler des bienfaits des nanotechnologies, à ce que, moi, je parle des risques, voire des risques extrêmes, le cauchemar

Je vais peut-être vous décevoir, mais je n'en ferai rien, car le débat ainsi posé est lourdement piégé. C'est cela que je voudrais développer avant de vous dire comment je vois l'évaluation du programme nanotechnologique – sujet de mon article dans le numéro des *Annales des Mines*.

Premièrement, 90 % de la littérature sur l'éthique des nanotechnologies parle des risques et uniquement des risques. Confondre l'éthique et la prudence, c'est une faute aussi grave que celle qui consisterait à confondre masse et poids.

Il se trouve que le ministère de la Recherche a récemment publié une plaquette qui vante les bienfaits des nanotechnologies, très bien faite d'ailleurs, qui s'appelle *A la découverte du nanomonde*. D'une part, il y a confusion de la prudence et de l'éthique : « ... *sans gommer les impacts sociaux ou éthiques qu'elles peuvent avoir (tout progrès scientifique comporte des risques)...* ». Deuxièmement, « *on peut faire confiance à l'intelligence de chacun pour conclure que les avantages de ces applications l'emportent de loin sur les inconvénients...* ». Comme si l'intelligence des acteurs avait quoi que ce soit à voir à l'affaire ! L'Allemagne des années 30, que je sache, était pleine de gens très intelligents, ça n'a pas évité le désastre que l'on sait.

Donc premier piège, une étude coûts/avantages, risque de conclure de cette manière : il y a des risques, certes, mais les avantages, étant donné l'intelligence de la communauté, l'emporteront forcément.

Deuxième piège, un tout petit peu plus subtil. Le risque toujours cité en premier est celui de ne pas être dans la course. Nous avons affaire à une course scientifique, technologique, industrielle, économique et militaire et, pour le bloc américain, le bloc européen et le bloc asiatique, il serait extrêmement grave de ne pas être dans la course. Mais supposez que cette course amène tout le monde au bord d'un précipice ... Vous voyez le problème et le piège...

Le troisième piège, encore un peu plus subtil, a trait à un problème méthodologique. Quand on fait une étude avantages/risques, il y a un présupposé, c'est l'hypothèse d'indépendance ou de séparabilité des risques/coûts et des avantages. Or bien souvent, cette hypothèse de séparabilité ne vaut absolument pas.

Du côté des avantages, on a le développement de techniques d'identification au service d'un programme sécuritaire : capteurs, senseurs, etc. Du côté des coûts, on trouve évidemment le risque que ces mêmes outils soient détournés par des criminels, des terroristes, etc. Accroître la sécurité, c'est créer une insécurité supplémentaire. Comme l'avait bien vu Locke, s'il suffit d'écrire une lettre pour dénoncer son voisin, c'est excellent pour la sécurité mais la liberté en prend un coup...

Le quatrième piège, c'est ce risque extrême que l'on associe en général à Eric Drexler, l'homme qui a inventé la notion et le mot même de nanotechnologie et qui, dans son *Foresight Institute* de Palo Alto mène un travail de lobbying

efficace. Son programme maximaliste inclut les fameux moteurs nanotechnologiques. On ne peut fabriquer de telles choses à l'échelle nanométrique qu'en leur permettant de se fabriquer elles-mêmes, c'est-à-dire en déclenchant des processus d'auto-organisation, d'où le risque que les engins en question s'autorépliquent de manière sauvage.

Le risque est que ces engins faits de carbone, à supposer qu'ils se reproduisent de manière sauvage, mangent tout ce qui est à leur portée. Qu'est-ce qu'ils mangent ? Des atomes de carbone, bien sûr. Où les prennent-ils ? Dans l'écosphère, en particulier la biosphère, et en particulier les êtres humains.

Le cinéma de Spielberg et Michael Crichton, l'auteur de *Jurassic Park* se sont emparés de cela. Je fais référence à l'énième roman de Michael Crichton, *Prey*, qui vient d'être traduit en français, où un nuage de nanoparticules devient une sorte de méta-être vivant et se nourrit de... sa proie, nous, évidemment.

Les scientifiques « sérieux » haussent les épaules ou se mettent à rigoler doucement en disant que ce risque n'a pas plus de réalité que le programme scientifique et technique de M. Drexler. L'un des principaux opposants à cela, c'est Richard Smalley lui-même, le découvreur des fullerènes, le C60 dont parlait M. Laurent tout à l'heure.

Il ne faut surtout pas rentrer dans ce débat. Mais j'observe que ce débat existe et qu'il fait intervenir trois temps. La dialectique entre ces trois temps n'est pas une chose nouvelle, on l'a déjà rencontrée avec les OGM et avec d'autres techniques.

- **Premier temps : Hyperbole.** On chante les bienfaits à venir du programme nanotechnologique, on en rajoute même, on parle d'un changement de civilisation, de paix mondiale, de fin des obstacles à la communication universelle, de résolution des problèmes d'environnement et d'énergie, etc.
- **Deuxième temps : Critiques.** Attirés par tant de bruit, les critiques montrent le bout du nez, extrêmement virulents, en particulier le groupe d'origine canadienne ETC qui fit déjà plier Monsanto sur la question des OGM et qui a déjà déposé, à ma connaissance, au moins trois moratoires, dont un à Johannesburg au Sommet de la Terre et un autre à Bruxelles.
- **Troisième temps : Modestie.** la communauté scientifique et technologique se rabat sur un discours modeste qui va même jusqu'à nier qu'il y ait un programme nanotechnologique. On vous dit qu'il n'y a jamais que telle ou telle expérience de chimie ou telle expérience technologique, que le programme nanotechnologique, c'est une pure illusion, c'est la science qui continue son petit bonhomme de chemin.

Il faut éviter que la communauté nanotechnologique se laisse prendre dans cette dialectique où on passe d'un extrême à l'autre, comme ce fut le cas pour le génie génétique. Aujourd'hui la moindre réalisation de génie génétique fait crier le grand public d'horreur.

Deuxième partie de mon exposé. A vrai dire, il n'y a pas de problème de nanotechnologies., Il est au niveau plus large de la « convergence » des NBIC (nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et de la communication, sciences cognitives). L'identité du domaine est philosophique, métaphysique. Elle remonte aux années 30, à la naissance de la cybernétique.

Il ne peut y avoir de « risques » que s'il y a réalisation matérielle, cela va de soi. Mais si on s'intéresse aux effets que le programme métaphysique a sur la société, l'économie, la politique, la culture, alors il n'est nul besoin que la réalisation matérielle ou technologique existe. Il suffit que les idées existent, que des projets soient formulés, que des ambitions soient manifestées pour alimenter les idées en place.

Ces effets du programme métaphysique des NBIC ont quatre dimensions : les effets sur notre relation 1. à la nature, 2. à la connaissance, 3. à l'éthique ; et 4. sur notre rapport aux catégories par lesquelles nous pensons le monde. Je ne peux pas traiter ça dans le fond, je vais juste dire deux mots sur la nature.

Le programme métaphysique des NBIC, selon moi, a un présupposé, c'est que tout dans l'univers – par « tout », je veux dire à la fois l'esprit humain, la vie, la nature non vivante - tout dans l'univers est machine informationnelle, dont le terme technique est « algorithme ».

On a commencé par mécaniser, au sens algorithme, l'esprit humain à la naissance de la cybernétique (1943), le modèle de Mc Culloch et Pitts.

Dans un deuxième temps, ça a été la naissance de la biologie moléculaire, c'est la mécanisation, l'algorithmisation de la vie. On dit souvent qu'il serait plus facile de dire « métaphore de l'ordinateur ». Le problème c'est que, à l'époque, l'ordinateur n'existait pas encore et que l'invention de l'ordinateur est une conséquence de cette révolution métaphysique. Voilà pourquoi je ne dis pas « concevoir l'esprit comme un ordinateur » ou « concevoir le génome comme un ordinateur ». A l'époque où ces idées ont émergé, se sont formées, l'ordinateur n'existait pas.

Dans un troisième temps, la nature elle-même. Les lois de la nature étant traitées comme « Turing-computable ». C'est ça le programme métaphysique. La transformation dont les NBIC sont à la fois la manifestation et la cause, car

tout cela est en boucle, c'est l'artificialisation de la nature. « Nature artificielle », c'est un oxymore, une contradiction dans les termes.

Voilà comment Damien Broderick dans son livre *The Spike* voit l'évolution biologique de la soupe primitive à aujourd'hui : « *Au départ, les algorithmes génétiques en nombre astronomique se déplaçaient en titubant à la surface de la terre et dans les profondeurs sous-marines.* » Ces algorithmes génétiques, c'est les cellules primitives, traitées comme des machines, déjà. « *Finalement, l'écologie tout entière du monde vivant sur la planète a accumulé et représente aujourd'hui sous forme comprimée et schématique, une quantité colossale d'informations.* » Cette citation suffit à montrer ce que j'entends par artificialisation de la nature.

Juste un mot sur la dernière dimension – le rapport aux catégories. Depuis que l'humanité existe, un de ses repères fondamentaux pour connaître le monde, c'est la distinction entre trois ordres qui sont le naturel non vivant, le vivant et l'artificiel. Or, avec les développements dont M. Laurent nous parlait, la distinction entre naturel non vivant, vivant et artefact, va tendre à disparaître puisqu'on va avoir affaire à des engins qui tiendront des trois ordres à la fois.

Notez bien, lorsqu'on parle de risques, on sous-entend que c'est mauvais. Mais là, je suis incapable de dire si les effets sont bons ou mauvais ! Ce n'est pas parce que ces questions sont très difficiles qu'il faut renoncer à penser ! Merci.

DEBAT

1^{ère} intervention de la salle

Quand on fait quelque chose – prendre des antibiotiques, décider une mesure d'évacuation... – on peut faire la liste des inconvénients, la liste des avantages.

Les nanotechnologies peuvent être présentées sous ces deux aspects, effrayant et extrêmement nécessaire pour le progrès de l'humanité. Tout le problème de cette action, c'est de s'arranger pour qu'elle ne soit pas défavorable, que l'on puisse maîtriser les effets négatifs et les regarder.

La science en général sous-estime les inconvénients. C'est une situation classique : une partie du budget doit être consacrée à la recherche des inconvénients.

Jean-Pierre Dupuy

Sortons de cette prison mentale qui consiste à mettre les avantages d'un côté et les coûts de l'autre. Sinon, la réponse est que grâce à l'intelligence de chacun, les risques seront nettement compensés par les avantages qui seront énormes.

2^{ème} intervention de la salle

Françoise Roure parlait de la concentration des moyens. Or les nanotechnologies, pour la grande majorité des recherches et développements en cours, c'est une affaire de petites équipes qui ont besoin de moyens décentralisés. Les transistors à haute mobilité ont été développés dans de petits laboratoires, pour des satellites légers avec de petites antennes. Les lasers à puits quantique, tout lecteur de CD-Rom en a. L'encre électronique, le papier électronique, ce sont de petites choses.

Certes, pour certains besoins, il faut de grandes unités centralisées comme Cray II. Mais ne prétendons pas qu'il faille uniquement des grandes centrales, comme le choix en a été fait dans notre pays. On ne décrète pas où sont les bonnes idées, comme nous cherchons trop à le faire.

Françoise Roure

Tout à fait d'accord avec vous. Il faut bien distinguer les trois niveaux : le fondamental, l'appliqué et ensuite l'industriel parce que les modes d'organisation pertinents ne sont pas les mêmes.

Sur l'opposition entre le modèle concentré de la recherche et un modèle diffus, aux Etats-Unis, on dit « If you don't know it, just try it ». Ils ont les moyens de faire des erreurs. Ils financent beaucoup en amont, de façon très disséminée, et élaguent fortement ensuite.

3^{ème} intervention de la salle

Je parlais de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne, de la Suède, de la Suisse, de la Hollande... Je n'oserais pas nous comparer aux Etats-Unis, on ne joue pas dans la même ligue. Je suis professeur aux Etats-Unis, je peux donc vous le dire : n'essayons même pas !

Par ailleurs, M. Dupuy a raison sur les chercheurs qui survendent l'intérêt de leurs recherches. Mais de là à dire que le « lobby » du nano a utilisé les arguments de Drexler pour vendre les nanos...

Jean-Pierre Dupuy

J'ai dit que les chercheurs ne rechignaient pas à recevoir les millions de dollars que le lobbying de Drexler fait pleuvoir sur eux. Mais que, par ailleurs, ils font mine, effectivement, de dire : « Je ne connais pas cet homme ! ». C'est exactement cela que j'ai dit.

4^{ème} intervention de la salle

Que pensez-vous qui pourrait, dans les années qui viennent, faire échec à la progression de cette vision mécanique du monde que vous dénoncez ?

Deuxième question. Comment nos sociétés, pas seulement la science, pourraient réfléchir un peu à ce qu'elles font ? Nous ne fonçons pas nécessairement vers le gouffre, mais nous fonçons sans savoir où nous allons.

Jean-Pierre Dupuy

Je vous remercie pour ces deux très bonnes questions.

La vision mécanique du monde. Je lui ai consacré un ouvrage, *The Mechanization of the Mind* (la mécanisation de l'esprit). Ce mouvement n'est pas politique, il est métaphysique . Rien ne peut l'arrêter. Sauf une catastrophe majeure que je ne souhaite pas ni ne me risque à prévoir.

Deuxième question. Il faut que la société aide la science à sortir de ce désarroi. Mais ça implique des efforts extraordinaires de la part de la société, en liaison avec la science. Je crois qu'il faut que les deux parties, la science et la société, réussissent à « mettre la science et la technique en culture ». L'information scientifique que débitent certains médias n'a rien à voir avec ce qu'il faut

appeler la culture scientifique. Ce sont des informations, des bouts d'information mais la culture scientifique c'est autre chose.

La moitié des Américains adultes – ce serait pareil en France – ne sait pas le temps qu'il faut à la terre pour faire le tour du soleil ou ne comprend pas la question posée. C'est plus que de l'enseignement, c'est faire que la science auprès du grand public devienne un élément essentiel de sa culture. L'effort est faramineux mais, celui-là, je crois non seulement qu'il est possible de le réaliser mais qu'il faut le réaliser.

Thierry Gaudin

Nous arrivons au bout de nos débats. C'est la transformation combinée de la technique et de la civilisation que nous avons devant nous. On savait depuis Einstein que la matière et l'énergie c'est une seule et même chose, nous apprenons que la structuration du temps et le vivant sont une seule et même chose. Le vivant crée le temps par la mémoire, il se déploie dans le temps parce qu'il a besoin du temps pour exister. Sa différence avec la matière inanimée, c'est qu'il n'obéit pas au principe de Carnot.

Avec l'Unicode, nous avons déjà sur nos micro-ordinateurs les alphabets du monde entier (65 000 signes) en face desquels nous sommes tous des illettrés et une diversité technologique (6 millions de références) comparable à la diversité du vivant (6 à 30 millions d'espèces animales et végétales dont 1,8 recensées). Ce qui valide aussi ce que disait, d'une manière visionnaire, Alvin Tofler, dans les années 70, lorsqu'il parlait de l'hyperchoix. La surinformation conduit à la désinformation. L'évolution de l'espèce humaine en devient inquiétante. Tant pour la protection de l'existence que pour celle de la biosphère, nous ne sommes plus assurés de rien.