

Communication de Monsieur Robert Mainard



Séance du 26 octobre 2007



Nanosciences et Nanotechnologies

Définitions

Nanosciences et nanotechnologies constituent un nouveau secteur de l'activité scientifique et industrielle humaine qui suscite, tout à la fois, fascination, espoirs et inquiétudes.

Elles ont pour objectif l'observation voire la manipulation des objets à très petite échelle, à une échelle que l'on appellera *nanométrique*, ainsi, évidemment, que l'étude des phénomènes qui leur sont liés. On sait qu'un nanomètre est la milliardième partie du mètre soit 10^{-9} m.

Ces nouveaux secteurs scientifiques et techniques seront donc, en premier lieu, concernés par les particules mises en évidence par la physique et la chimie, à savoir les *atomes*, les *molécules*, les *électrons* et les *photons*, etc.

Toutefois le fait de manipuler la matière ou le vivant à cette échelle ne constitue pas, en soi-même, une révolution. Ainsi la molécule d'ADN, large de quelques nanomètres, est manipulée de manière fine, depuis longtemps par des techniques indépendantes des nanotechnologies. De même les biochimistes fabriquent couramment médicaments et marqueurs biologiques, à cette échelle.

L'originalité de ce nouveau domaine se situe donc ailleurs. C'est ce que nous allons essayer de démontrer.

Origines : Feynmann et Drexler

En juin 2002 le gouvernement américain lançait un vaste programme interdisciplinaire, dénommé *“Converging Technologies”*. Dans le document d’introduction on pouvait lire cette phrase :

“Quand les technologies du XXI^{ème} siècle convergeront, l’humanité, grâce à elles, pourra enfin atteindre un état marqué par la paix mondiale, la prospérité universelle et la marche vers un degré supérieur de compassion et d’accomplissement.”

Cette convergence des technologies, connue sous l’acronyme NBIC, concerne les *Nanotechnologies*, les *Biotechnologies*, les *Technologies de l’Information*, et les *Sciences Cognitives*, les premières étant censées tirer tout l’attelage.

La notion même de *Nanotechnologie* fut introduite, indirectement, par le physicien américain Richard Feynmann, prix Nobel de physique, lors d’une conférence faite à l’Université Technologique de Californie (Caltech) le 29 décembre 1959. Feynmann déclara, entre autres choses, en cette occasion :

“Les lois physiques autorisent, a priori, la manipulation et le contrôle de position des atomes et des molécules individuellement, un par un”.

Un jeune physicien fut considérablement influencé par les idées de Feynmann. Il s’agissait d’Eric Drexler, qui préparait, à l’époque, une thèse sous la direction de Marvin Minsky, l’un des fondateurs de *l’intelligence artificielle*.

Drexler écrivit et publia alors deux livres programmes : *Engines of creation*, en 1986, qu’on peut peut-être traduire par *“Les moteurs de la création”*, puis, en 1992, un second ouvrage dont le titre donnerait à peu près en français : *Calcul et fabrication de machines moléculaires pour nanosystèmes*. Dans ces ouvrages Drexler spéculait hardiment sur le développement des nanotechnologies et de leurs applications potentielles en introduisant, au passage, un autre concept, celui de *nanosciences*. Néanmoins ses idées quelque peu visionnaires, ne furent pas, de prime abord, accueillies très favorablement tant par la communauté scientifique que par les milieux industriels et des affaires.

Les choses allaient toutefois changer assez rapidement et l’intérêt porté à ce nouveau secteur scientifique amena Drexler à fonder, dès 1986, *l’Institut de Recherches Foresight*, ou *Foresight Institute* à Palo Alto, en Californie, établissement destiné à promouvoir les *nanosciences* et les *nanotechnologies*. Depuis cette création Drexler organise, chaque année, dans cet Institut, des congrès mondiaux dont le succès va croissant.

Aspects fondamentaux

1. Les démarches nanoscientifiques

On pourrait penser, a priori, que les nanosciences et les nanotechnologies constituent une extension naturelle des travaux déjà effectués aux échelles macro et microscopiques, par exemple en microélectronique et en micro-informatique.

Il n'en est rien car, en effet, lorsque les dimensions caractéristiques des éléments diminuent, par exemple, du niveau macroscopique au microscopique, des phénomènes nouveaux apparaissent et des effets prépondérants au premier niveau deviennent négligeables au second, alors que d'autres s'imposent. Ainsi à l'échelle de quelques microns les *forces de gravité* deviennent négligeables alors que les *forces de tension superficielle* deviennent plus intenses. Lorsqu'on diminue encore les dimensions d'un échantillon de matière, pour atteindre le *niveau nanoscopique*, d'autres phénomènes apparaissent, liés au fait que, pour un échantillon donné, le nombre d'atomes en surface n'est plus négligeable par rapport à ceux du volume, ce qui se traduit par de nouvelles propriétés physiques, chimiques et même biologiques.

Cette approche du macro au nano est appelée "top-down" (de haut en bas) ou descendante. C'est l'approche habituelle.

Il existe un cheminement inverse dit "bottom-up" (de bas en haut) ou démarche ascendante qui permet de comprendre comment passer de l'échelle atomique à l'échelle des nanosystèmes.

Partant alors des *atomes* on obtient, successivement, des *molécules* plus ou moins complexes puis des *amas* de celles-ci se regroupant en *nanoparticules* dont la taille pourra atteindre, dans certains cas, la dimension du micromètre ; l'étude approfondie de ces groupements d'atomes ou de molécules, nécessitant d'importants moyens de calcul informatique.

Dans un secteur se situant grossièrement entre échelle nanométrique et échelle micrométrique interviendra alors une physique particulière dite *mésoscopique ou physique des états intermédiaires*, c'est-à-dire faisant appel tantôt aux lois de la *physique macroscopique*, tantôt à celles de la *physique quantique*.

L'un des problèmes qui va se poser, alors, au physicien consistera à définir les domaines de validité de ces différentes physiques, domaines qui dépendront tout à la fois de l'objet et du phénomène concernés.

2. Les approches théoriques

Les scientifiques étudient donc depuis longtemps des entités comme les atomes et les molécules, par exemple en physique atomique et moléculaire,

en chimie, en spectroscopie ou encore en biologie. Depuis longtemps tous se sont attachés à la compréhension des phénomènes jusqu'à la *dimension la plus ultime* de la matière.

Toutefois les scientifiques se sont avérés incapables avant 1980, d'une part de procéder à la manipulation directe des particules de la physique et d'autre part d'effectuer l'étude isolée d'une particule unique.

C'est donc à partir de 1980, date cruciale, que ces aptitudes nouvelles ont été acquises par les expérimentateurs.

Il sera donc possible pour les scientifiques, dans ces conditions nouvelles, d'étudier les diverses propriétés de ce que nous appellerons désormais des *nanosystèmes* et bien évidemment de les utiliser au plan des applications pratiques. Ces propriétés dépendront fortement, à l'évidence, de la manière dont ces nanosystèmes ou nanomatériaux auront été synthétisés, arrangés ou exploités, en un mot "*nanostucturés*".

D'après les considérations précédentes il apparaît, de façon claire, que pour prévoir et bien comprendre les phénomènes qui se produisent à cette échelle, *il ne s'agira pas d'inventer une nouvelle science, mais simplement d'appliquer les lois bien connues de la physique et de la chimie à l'échelle nanométrique en tenant, évidemment, compte du comportement spécifique des objets et des phénomènes.*

En particulier quand cela s'avèrera nécessaire il conviendra de faire appel, par exemple, aux ressources de la mécanique quantique.

C'est la raison pour laquelle, selon nombre de spécialistes, parler de *nanosciences* n'est pas indispensable. De fait cette appellation spécifique doit plutôt être considérée comme une *nouvelle grille de lecture des disciplines scientifiques*.

Par contre le fait réellement nouveau, c'est l'aptitude, acquise depuis peu par l'homme de science, à façonner la matière à cette nouvelle échelle. Cette compétence peut effectivement être considérée comme une nouvelle technologie d'où le nom, quant à lui parfaitement indiscutable, de nanotechnologie.

3. Les nanosciences et les nanotechnologies sont-elles une mode ?

En effet on peut se demander si *nanosciences* et *nanotechnologies* ne constituent pas, tout simplement, une mode passagère et non une dynamique nouvelle susceptible de révolutionner science et technologie.

Nous allons essayer de répondre à cette question.

Il existe une loi, bien connue : *la loi de Moore*, jamais démentie en électronique et en microélectronique, depuis plus d'un demi-siècle, qui stipule que le nombre de transistors, incorporés sur une même surface de puce, double tous les 18 mois. La réduction de taille corrélative des composants va amener l'ingénieur à les considérer comme des objets justiciables d'une autre physique : *la physique quantique, et donc à revoir le principe de fonctionnement des transistors.*

Il va en résulter que pour maîtriser son évolution, l'électronique devra obligatoirement, au plan fondamental, faire appel à de *nouvelles sciences ou tout au moins à de nouveaux secteurs des sciences* et, au plan des applications pratiques ou prolongements industriels, imaginer de *nouvelles organisations.*

Enfin, *on constate que les barrières qui pouvaient encore exister entre les différents secteurs scientifiques, se sont littéralement volatilisées avec l'avènement du "nanomonde",* comme, par exemple, celles séparant chimie, biologie moléculaire ou encore mécanique.

En conclusion les *nanotechnologies* conduisent donc, d'une part à la convergence des sciences, ce qui se traduit par une *révolution* des esprits et, d'autre part, à une redéfinition des domaines de la recherche, ce qui implique, par voie de conséquence, une restructuration des équipes et des laboratoires.

Il semble donc bien qu'on assiste, non pas à l'apparition d'un phénomène fugace lié à une mode passagère, mais bel et bien à l'émergence d'une mutation fondamentale.

Aspects expérimentaux

1. Retour à l'échelle nanométrique

En définitive, au plan expérimental, les nanotechnologies vont se caractériser essentiellement par la conception et l'élaboration de nouveaux matériaux ou encore de nouveaux dispositifs, comme peuvent le permettre le contrôle et la manipulation de la matière à l'échelle atomique.

Un matériau *nanostucturé*, c'est-à-dire dont la structure intime a été agencée par nanotechnologie, présente des propriétés pouvant différer notablement de celles du même matériau pris sous sa forme naturelle ou habituelle. Ceci est particulièrement vrai, par exemple, en ce qui concerne les propriétés mécaniques.

2. Microscopie électronique et microscopies à pointe

Les nanotechnologies ont vu leur développement s'accélérer considérablement avec une invention nouvelle, apparue il y a un peu plus de vingt ans, la *microscopie à pointe* dont nous évoquerons deux des aspects :

- La *microscopie à effet Tunnel, ou en champ proche (Scanning Tunneling microscopy ou STM)*.
- La *microscopie à force atomique (Atomic Force Microscopy ou AFM)*.

Ces outils ont été conçus et réalisés pour permettre l'observation de la matière et des phénomènes à l'échelle atomique ou moléculaire. Leur fonctionnement est assez complexe mais on peut en décrire, assez simplement, le principe et le dispositif.

L'organe essentiel est constitué par une *pointe très effilée*, montée sur des *capteurs, par exemple piézoélectriques*. Dans la *Microscopie à Effet Tunnel* il n'y a pas contact entre pointe et surface, alors que dans la *Microscopie à Force Atomique* il y a contact.

Ainsi, dans le *Microscope à effet Tunnel*, quand on approche cette pointe au voisinage de l'échantillon de substance en cours d'examen, il apparaît entre pointe et surface, un courant électrique, provenant d'un effet quantique, qu'on appelle l'*effet Tunnel*. L'intensité de ce courant est particulièrement sensible à la distance entre la pointe et la surface ; elle augmente quand cette distance diminue.

On peut alors mesurer ce courant en chaque point de la surface, tout en balayant celle-ci, et les données expérimentales recueillies, traitées par informatique, permettent de réaliser ce qu'on peut appeler une *cartographie* de cette surface.

Ces outils permettent donc de visualiser aisément des morphologies à l'échelle atomique, de tracer des motifs à cette échelle par *photolithographie* (par action d'un faisceau de lumière) ou *lithographie électronique* (par action d'un faisceau d'électrons) et enfin, comme nous allons le voir, *de manipuler le matériau*.

3. Manipulation directe des atomes

Un microscope à pointe, tel que celui à Effet Tunnel, permet en outre la manipulation directe, atome par atome.

Pour cela on commence par stabiliser la pointe au-dessus d'un atome particulier puis on applique à la jonction tunnel, normalement polarisée à faible tension, une *impulsion brutale*. Le champ intense ainsi créé permet d'arracher un atome et de le déposer sur la pointe ou de faire exactement le contraire en inversant la polarité de l'impulsion.

Le transport atome par atome ne pose donc pas de problème de principe.

Ce sont les chercheurs Gert Binnig et Heinrich Rohrer, de l'équipe IBM de Zurich, qui mirent au point, entre 1982 et 1985, le microscope à balayage, lequel permit, pour la première fois, *de visualiser directement les atomes.*

Ces travaux valurent à leurs auteurs l'attribution du prix *Nobel de Physique en 1985.*

Par ailleurs Binnig et Rohrer réussirent, en 1990, à écrire le sigle de leur entreprise (IBM) avec une cinquantaine d'atomes de *Xénon* sur une surface de *nickel* en utilisant une pointe de *tungstène.*

Il est aussi possible, par la même technique, de déplacer d'autres atomes comme *le silicium*, mais avec de plus grandes difficultés car les forces en jeu sont plus intenses. On peut aussi arracher globalement, et d'un coup, des *agrégats* de milliers d'atomes ou encore envisager la construction de "*nanobalances*" susceptibles de détecter la présence d'un seul "nano-objet", un seul virus, par exemple.

Réalisations actuelles

Le rythme du développement des *nanosciences* et des *nanotechnologies* est tel qu'il est difficile de collationner toutes les informations disponibles, à un instant donné, et, par conséquent, de donner un tableau exhaustif de la situation dans ce champ nouveau et bien particulier de la science et de la technique.

Aussi ne ferons-nous qu'explorer succinctement, ici, quelques domaines.

I. Les matériaux

Ainsi les matériaux *nanosstructurés* présentent des propriétés nouvelles et intéressantes qui dépendent de la taille des *nanosstructures* elles-mêmes, et qui peuvent différer notablement des propriétés des matériaux tels qu'on les rencontre dans leur état habituel, soit dans la nature soit après un traitement classique.

1. Les nanoparticules

Les *nanoparticules* présentent des caractéristiques intrinsèques susceptibles d'être mises à profit dans nombre d'applications telles que certains dispositifs électroniques, des catalyseurs pour piles à combustible, des matériaux spécifiques pour batteries d'accumulateurs, entre autres, mais aussi dans beaucoup de produits cosmétiques. Récemment des nanoparticules magnétiques ont été utilisées en *thérapie génique.*

2. Les nanotubes

Le *nanotube de carbone*, découvert en 1991 par le Japonais *Ijima*, se prête à de multiples applications.

Chaque *nanotube* est, en réalité, une feuille de *graphène*, structure bidimensionnelle d'atomes de carbone, qui peut aussi être considérée comme une *molécule géante* composée de plusieurs milliers d'atomes, disposés en cage, ce qui confère à la molécule une symétrie en hélice ainsi que de remarquables propriétés.

Ces nanotubes manifestent une préférence marquée pour les *pavages hexagonaux*.

Ijima avait découvert de tels *nanotubes* dans la suie, provenant de l'action d'un arc électrique sur du graphite. Des techniques plus élaborées et plus performantes ont été proposées ultérieurement, notamment par des chercheurs de l'*Université de Bordeaux*.

Le *nanotube de carbone* est donc une molécule insolite aux propriétés assez fascinantes. Ainsi ce *nanotube* possède des *propriétés mécaniques exceptionnelles*. Disons, pour simplifier, qu'il présente la particularité d'être 50000 fois plus fin qu'un cheveu et 100 fois plus solide qu'un câble d'acier, en traction, à égalité de diamètre. Il peut être plié et déformé sans jamais se casser.

De plus suivant leur dimension, leur forme et leur mode de préparation, les *nanotubes* de carbone peuvent présenter des *propriétés électriques inattendues*. C'est ainsi qu'ils peuvent être aussi bien *conducteurs* que *semi-conducteurs* ou *isolants*, propriétés particulièrement intéressantes en nano-électronique. Les propriétés mécaniques de ces tubes sont utilisées dans le renforcement des matériaux et le *stockage de certains gaz*, mais aussi dans la fabrication de micro-réfrigérateurs et de pompes à chaleur.

Leurs propriétés électriques sont exploitées dans la conception et la réalisation de matériels électroniques ou informatiques de pointe tels que les nouveaux écrans plats pour moniteurs ou récepteurs de télévision ou encore les microprocesseurs de la nouvelle génération.

Quoiqu'il en soit, on dénombre déjà plus de soixante applications industrielles. Chaque jour de nouvelles sont proposées.

3. Les Fullérènes :

Les *fullérènes* sont constitués d'atomes de carbone tels que leur forme et leur aspect géométrique évoquent plus ou moins ceux d'un ballon de football.

Ces molécules particulières, aux structures et aux capacités étonnantes, sont formées de 60, 70, 82 ou 84 atomes de carbone, les atomes se disposant suivant leur nombre en pentagones (figures à 5 côtés) ou en hexagones (figures à 6 côtés) créant ainsi une surface quasi-sphérique.

Pour leurs travaux sur ces molécules, Curl, Smalley et Kroto ont reçu le *prix Nobel de Chimie* en 1996. Nous aurons l'occasion de reparler de Smalley ultérieurement.

Les résultats de leurs recherches sont tellement denses qu'il est impossible de les énumérer ici. Nous préciserons seulement qu'ils ont permis de concevoir de nouvelles molécules, toujours à base de carbone, encore *plus complexes* que les fullérènes eux-mêmes, et susceptibles d'applications diverses. C'est ainsi qu'on envisage de les utiliser ultérieurement dans la réalisation de *rouages* pour d'éventuels nanomoteurs.

Une autre application prometteuse de ces *fullérènes* réside dans leur capacité à emprisonner à l'intérieur de leur structure des entités chimiques aux propriétés variées. Ainsi, isolée au coeur d'une molécule de fullérène, une telle entité ne pourra interagir avec le milieu extérieur.

Les fullérènes se comportent donc comme de véritables boîtes à l'échelle mésoscopique.

En médecine on pense déjà les utiliser comme vecteurs de transport, contre les cellules cancéreuses en les "*chargeant*" avec des médicaments radioactifs afin de détruire les noyaux de ces cellules sans causer de dommages conséquents au reste de l'organisme.

Enfin, à partir de ces fullérènes, une société japonaise a démarré, en 2006, la fabrication de piles à combustible d'un type nouveau, *offrant une capacité dix fois supérieures à celle des batteries au lithium actuelles des ordinateurs portables* et ne générant que de la vapeur d'eau.

II. Le transistor moléculaire

Parmi les découvertes les plus récentes on peut citer, aussi, le transistor moléculaire ou "*organic nanotransistor*" imaginé et construit par certains laboratoires américains. Ce *transistor organique*, composé d'éléments de carbone, serait capable d'effectuer les mêmes tâches qu'un transistor normal, c'est-à-dire de détecter un signal électromagnétique, de l'amplifier et d'aiguiller les informations correspondantes.

Ce nouveau dispositif dont la taille serait de l'ordre du millionième de celle d'un grain de sable pourrait à terme, selon les ingénieurs, remplacer plusieurs milliers

de transistors traditionnels tout en étant moins encombrant et en opérant à une vitesse bien plus grande.

III. Nanofabrications diverses

1. *Principes.*

Quand on s'attaque aux *nanofabrications* la mise en oeuvre de procédés à cette échelle ne va pas sans difficultés. Ainsi nous avons vu que la microscopie à pointe permettait de déplacer les atomes, mais *il est évident que le fait de déplacer ces atomes unité par unité, dans la matière, s'il présente une énorme avancée fondamentale, ne conduit pas à des applications pratiques d'un énorme intérêt.*

A titre d'exemple et afin de montrer l'étendue du problème, considérons une simple feuille de papier et supposons que nous voulions *"la reconstruire nanométriquement"*, à partir de ses molécules. Supposons, de plus, que nous puissions en manipuler un million par seconde, ce dont nous sommes bien incapables pour l'instant. Pour reconstruire cette simple feuille, il nous faudrait, néanmoins, de l'ordre de *13 milliards d'années*, soit, à peu de choses près, un temps identique à l'âge estimé de l'univers.

Il faudra donc faire appel à un autre procédé qui va totalement révolutionner les nanotechnologies, si on arrive, un jour, à le mettre au point à grande échelle. Ce procédé est appelé l'auto-assemblage.

Ce fait est capital pour l'avènement des nanotechnologies sous leur forme la plus révolutionnaire. La définition la plus simple a été formulée par les Américains Kuhn et Ulman :

Imaginons que nous considérons un ensemble complexe de composants reliés entre eux. Le procédé, évoqué ici, va utiliser la faculté de cet ensemble à établir une organisation hiérarchique, supramoléculaire, de ses composants.

Cette organisation peut, d'ailleurs, soit naître spontanément, soit apparaître sous l'action d'un agent extérieur.

Certes les résultats obtenus, à ce jour, ne sont pas encore très spectaculaires, mais quelques résultats méritent néanmoins d'être signalés.

2. *Premier exemple : une nano-usine.*

Ainsi un *fil nanoscopique* de cuivre a été fabriqué, simultanément, par les laboratoires du Centre des matériaux de Toulouse et ceux de l'Université de Aarhus au Danemark. Ce fil, large de 0,75 nanomètre, soit la dimension de deux atomes de cuivre, est un exemple particulièrement spectaculaire de ce qu'on peut appeler la *"nanominiaturisation"*.

La minuscule usine est une simple *molécule organique composée de 90 atomes de carbone et de 98 d'hydrogène*. Elle se présente sous la forme d'une table minuscule dotée de quatre pieds, lesquels posés sur la surface plane d'un cristal de cuivre confèrent à l'ensemble une propriété étonnante : celle d'autoassembler les atomes de cuivre en un fil atomique, fil qui se forme au fur et à mesure que l'on déplace la molécule sur la surface.

Les spécialistes considèrent que "*cette technique représente un des premiers processus connus d'autofabrication nanoscopique*". Il semble bien, en effet, qu'avec cette réalisation une étape importante ait été franchie.

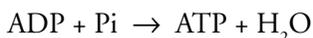
3. Deuxième exemple : un nanomoteur rotatif

Certaines équipes scientifiques ont très récemment mis au point des *moteurs moléculaires élémentaires* de différents types en réussissant, par exemple, à faire effectuer une *rotation* ou un *déplacement linéaire* à une molécule unique ou à une partie de molécule, par l'action soit d'un élément chimique, soit de la lumière.

Ces travaux revêtent une importance primordiale car ils font déjà franchir un pas de plus, et important, aux nanotechnologies. On sait déjà, depuis quelque temps, fabriquer certains "*mécanismes*" élémentaires de la taille d'une ou de plusieurs molécules. Toutefois tant la conception que la fabrication de *nanomoteurs*, tels qu'imaginés par Dressler, accusent indiscutablement un certain retard, et cela malgré les réalisations de certaines équipes internationales.

Ainsi l'équipe de Montegnano à *Cornell University*, aux Etats-Unis, a conçu un moteur rotatif biomoléculaire, fondé sur le mouvement d'une molécule d'*ATP-synthase*, mouvement qui peut, d'ailleurs, être observé au microscope.

L'*ATP-synthase* est une *enzyme (complexe protéique enzymatique* pour les spécialistes), présente dans nombre de membranes comme, par exemple, des membranes plasmiques animales ou végétales, enfermant des substances organiques intérieures à la cellule. Cette enzyme catalyse la formation d'*ATP (Adénosine triphosphate)* à partir d'*ADP (Adénosine diphosphate)* et de *phosphate inorganique*, selon une réaction *endoénergétique* qui peut se résumer sous la forme :



Cette réaction requiert donc un apport d'énergie qui est assuré par l'utilisation d'un *gradient électrochimique de protons* (c'est-à-dire *d'ions hydrogène*) ces protons traversant la membrane dans laquelle est insérée l'enzyme par un passage privilégié.

Ce gradient de protons est produit dans la membrane elle-même à la suite d'un processus très complexe où peuvent intervenir la chaîne respiratoire de l'organisme ou encore sa chaîne photosynthétique.

La structure de l'*ATP-synthase*, résolue en 1994, montre ainsi deux parties de forme approximativement cylindrique, d'un diamètre maximum de dix nanomètres. La première partie, *Pr*, dite *apolaire*, que l'on qualifie parfois de "*turbine à protons*", ou encore de "*rotor*", est incluse dans la membrane, et la seconde, *P_s*, dite *globulaire* ou encore "*stator*" dans laquelle s'effectue la synthèse de l'ATP, est directement au contact de la *matrice mitochondriale* (intérieur de la cellule). Cette synthèse repose donc sur une conversion énergétique qui s'effectue par le biais du changement de conformation structurelle des *sous-unités*.

Ainsi :

dans *Pr* (rotor), il existe des sous-unités en particulier membranaires,

dans *P_s* (stator), il existe des sous-unités catalytiques, structurelles et membranaires.

Le rôle de ces différentes sous-unités, bien que très important, ne sera pas explicité ici.

Nous précisons seulement que les variations de structure interne, liées aux différentes sous-parties, font que le transfert d'énergie de *Pr* vers *P_s* accompagne la rotation d'une partie de la molécule (*rotor*) par rapport à la partie restante (*stator*).

Cette rotation peut s'effectuer dans un sens ou dans l'autre suivant les réactifs et le sens des échanges énergétiques.

Sans entrer dans le détail des réactions chimiques et énergétiques, qui interviennent ici, on peut considérer que l'ensemble ADP/ATP se comporte comme une batterie chimique.

L'ATP présente une importance considérable, pouvant en particulier servir au métabolisme cellulaire et participer, par son hydrolyse, à bien d'autres phénomènes vitaux au niveau de la cellule.

Une équipe japonaise, dirigée par Yoshida, a réussi à mettre cette rotation en évidence en fixant un très long filament (1 à 3 microns) d'*actine fluorescente* à l'extrémité supérieure du rotor *Pr* et en fixant le stator *P_s* sur une surface de nickel pour laquelle certaines sous-parties présentent une affinité chimique qui se traduit par des liaisons. La visualisation du mouvement se fait au moyen d'un microscope à fluorescence.

Montegnano et son équipe ont, de leur côté, réussi à fixer une pale en nickel à la partie supérieure (rotor) de ce *nanomoteur*.

4. Troisième exemple : un nanomoteur alternatif

Il s'agit d'un nanomoteur *solaire* appelé "Sunny" et construit par trois chercheurs de l'université de Bologne, Balzani, Credi et Venturi, en collaboration avec des scientifiques de l'université de Californie.

Leur *nanosystème*, que l'on appelle rotaxane, est composé de deux molécules organiques dont l'une, en forme d'anneau, M, glisse le long d'un axe formé par l'autre, L. Sans entrer dans l'explication détaillée du mécanisme expliquant le comportement de ce rotaxane, on peut préciser, néanmoins, que celui-ci se fonde sur des complexes *accepteur d'électron / donneur d'électron*, phénomène bien connu des physico-chimistes. On observe expérimentalement que, sous l'action de la lumière, l'anneau bleu M oscille entre les parties rouge (A) et verte (B) de l'axe L.

Le fonctionnement alternatif de ce nanomoteur rappelle quelque peu celui d'un moteur mécanique classique. La molécule annulaire mobile se déplace très rapidement, la distance qu'elle parcourt, inférieure au nanomètre, est effectuée en moins d'un millième de seconde, ce qui équivaudrait à 60 000 tours par minute pour un moteur normal.

Toutefois, pour obtenir une *force résultante macroscopiquement mesurable* et récupérer du travail, il faudrait, d'après Balzani, pouvoir synchroniser l'action de millions de molécules "rotaxane", par exemple toutes celles d'une même solution. On n'en est pas encore là, mais *la piste ouverte est, toutefois, suffisamment prometteuse* pour que de nombreuses équipes de recherche concentrent, désormais, leurs efforts sur des problèmes semblables.

Ces premiers résultats, fondés essentiellement sur les propriétés de la matière au niveau atomique et moléculaire, malgré leur relative modestie, laissent tout de même quelques espoirs.

IV. La spintronique

Dans les composants électroniques actuels (on dit "standard") la fonctionnalité provient de *courants électriques*, les porteurs étant discriminés uniquement par leur charge électrique. L'électronique de spin ou *spintronique* est le secteur émergent qui se propose d'utiliser *le spin (de fait le moment magnétique associé) des électrons de conduction* comme un degré de liberté supplémentaire pour générer des fonctionnalités nouvelles.

D'ores et déjà, de la *spintronique* est issue, par exemple, la *magnétorésistance géante*, utilisée dans les disques durs d'ordinateurs.

On peut affirmer, d'ailleurs, sans grande crainte d'erreur que la *spintronique*, sera la prochaine révolution de la microélectronique, surtout quand le transistor de spin sera mis au point, ce qu'on estime réalisable au cours de la seconde décennie de ce siècle.

V. Réflexions sur les quelques réalisations présentées

On pourra retenir des divers travaux des chercheurs actuels :

- La convergence entre les *diverses technologies* et *les sciences du vivant*.
- La quasi-disparition des frontières disciplinaires, théoriques et multiséculaires qui existaient entre *biologie* et *physique* par exemple. L'association des biotechnologies et des nanotechnologies va très certainement permettre le développement ultérieur des deux disciplines et de leurs applications.
- *Le fait que les cellules biologiques, nanomachines extraordinairement complexes, pourront servir de modèles à nombre des réalisations futures des ingénieurs, soit que ceux-ci visent à dynamiser le développement industriel, soit qu'ils cherchent à fournir à la médecine des outils d'une efficacité inconnue à ce jour.*

Perspectives

Tout ce que nous avons évoqué jusqu'ici a pratiquement déjà été réalisé ou est sur le point de l'être. Nous allons maintenant tenter de faire un bilan ainsi qu'un peu de prospective.

1. Ce qui est sûr ou à peu près sûr

Les *nanomatériaux* sont déjà présents dans nombre de secteurs de l'activité économique et le seront de plus en plus avec la généralisation des *nanofabrications*.

On utilise les nanoparticules dans certains dispositifs électroniques, comme catalyseurs dans les piles à combustibles, dans les matériaux spécifiques de certaines batteries d'accumulateurs entre autres usages. On les rencontre aussi dans la composition des cosmétiques. Par ailleurs nous avons déjà évoqué l'intérêt, tout particulier, des *nanotubes* de carbone ainsi que des *fullérènes*.

Il est à peu près certain que les futures *nanopuces* vont révolutionner l'informatique. Ces nanopuces, sans aucun doute constituées bientôt par les molécules elles-mêmes, deviendront les éléments de base des circuits électroniques, leur conception et leur fonctionnement utilisant alors les *effets quantiques* qui jouent à ce niveau. Corrélativement la puissance des appareillages électroniques et informatiques va croître et leur miniaturisation s'accroître.

On assistera, aussi, à l'essor de nouvelles sciences comme l'*optronique*, c'est-à-dire d'un secteur associant optique et électronique au plan d'activités tant scientifiques qu'industrielles.

En *nanobiotechnologie*, après le séquençage du génome humain, on a besoin de connaître la structure des quelque 300 000 protéines générées par ce génôme, car on ne connaît seulement que celle de quelques milliers d'entre elles.

Dans ce secteur, les nanobiotechnologies vont permettre, d'abord de parfaire nos connaissances en pharmacologie, ensuite de donner une impulsion à la fabrication de nouveaux médicaments, de les tester et de les vectoriser.

Elles contribueront encore, entre autres choses, à l'amélioration du diagnostic, à l'activation des molécules anticancéreuses, à la *neuroprothèse* et à l'*ingénierie tissulaire*.

Elles pourront enfin conduire à la construction et à la mise au point de *nanosystèmes intelligents*, comme par exemple des nanopompes délivrant de façon optimale de l'insuline aux diabétiques.

On peut d'ores et déjà estimer que, de façon irréversible, les *nanotechnologies* auront un impact de plus en plus grand dans à peu près tous les domaines de l'activité humaine, tant dans la vie privée que dans les secteurs économique, industriel, politique et social. C'est ainsi qu'elles interviendront dans les sciences médicales et pharmacologiques, l'environnement, l'agriculture, l'industrie manufacturière et minière, les transports, la production et le transport d'énergie, l'espace, les armements, le calcul informatique, l'information et la communication.

2. Ce qui relève, pour l'instant, tout au moins, du domaine des visionnaires

Les *nanorobots* et autres *nano-assembleurs*, même sous une forme relativement élémentaire, seront à l'origine de grandes avancées technologiques, permettant par exemple, une manipulation effective au niveau moléculaire.

A titre d'exemples nous citerons, avec la réserve et la prudence nécessaires, quelques applications alors possibles :

La fabrication d'objets macroscopiques à partir, par exemple de *nanotubes de carbone* : une voiture pourrait avoir alors une masse de quelques dizaine de kilos et une station spatiale celle d'une voiture actuelle, ces objets étant beaucoup plus résistants que les réalisations actuelles et bien moins coûteuses.

Les *interventions médicales ou chirurgicales* à l'échelle nanométrique ouvriraient aussi un champ illimité à la thérapeutique, permettant par des actions vectorisées et ciblées, aussi bien de redonner des forces à un système immunitaire défaillant que de guérir des maladies comme le cancer et le sida.

On peut considérer que certains projets relèvent véritablement du délire : ainsi les ingénieurs de la NASA ont imaginé un ascenseur spatial pour satellites.

S'ils étaient réalisés un jour, ce que certains contestent, les *nanorobots* et autres *nano-assembleurs*, prévus par Drexler, pourraient manipuler les molécules comme des objets ordinaires, surtout *si ces nanomachines étaient capables d'autoréplication, voire d'autocomplexification*.

On peut alors imaginer, dans le cadre de ces hypothèses, quelle serait l'efficacité d'une armée de nanorobots lancés sur un chantier quelconque, pour la réalisation duquel ils auraient été spécifiquement préprogrammés, et s'autorépliquant au fur et à mesure des besoins de l'ouvrage. Ils pourraient alors réaliser en quelques heures, peut-être moins, ce que des milliers d'ouvriers feraient en plusieurs années.

L'état actuel des nanosciences et des nanotechnologies

I - Les nanotechnologies dans le monde

Un bon moyen d'apprécier l'avenir des nanotechnologies est sans doute d'examiner les efforts financiers qui sont consentis, en nanosciences et en nanotechnologies, par les grandes puissances tant dans le domaine de la *recherche académique* que dans celui de la *recherche développement*.

Les sommes consacrées aux recherches se sont élevées à 9 milliards de dollars en 2006 ; le seul budget des USA s'est élevé à 3 milliards de dollars dont un milliard de dollars fédéraux.

L'effort total des pays européens s'est élevé à environ un milliard d'euros dont environ 700 millions d'euros de contributions nationales et environ 300 millions d'euros annuels pour le 6^{ème} PCRDT (*Programme Cadre de Recherche et Développement Technologique*).

Au total le 6^{ème}PCRDT pour la priorité "*Nanosciences et Nanotechnologies*" s'élève à 1,3 milliard d'euros pour les 5 ans du programme.

Au niveau mondial le Japon talonne les USA. Son effort financier était en 2001 égal à celui des Américains, mais depuis ceux-ci ont pris une nette avance. La Chine, les Indes et le Canada sont les pays émergents hors d'Europe.

Dans ce dernier continent, l'Allemagne est en tête, suivie de près par l'Angleterre, l'Italie et la France arrivant en troisième position, talonnées par la petite Suisse.

Il est probable qu'en 2007 et 2008 les crédits affectés à ce secteur dans le monde auront connu un accroissement considérable.

En ce qui concerne l'activité économique liée aux nanotechnologies, on estime qu'elle correspondra à 1000 milliards de dollars annuels au cours de la seconde décennie du siècle d'après une prévision raisonnable. Mais d'aucuns prétendent que cette activité pourrait atteindre les 3000 milliards de dollars.

II - Les nanotechnologies en France

La France, malgré des retards et des difficultés, aux causes multiples, tient une certaine place dans le secteur des *nanosciences* et *nanotechnologies*, mais bien loin de celle qu'elle devrait occuper.

Rappelons néanmoins que c'est dans le laboratoire du Français Albert Fert que la *magnétorésistance géante* a été découverte. Pour ses travaux en spintronique il a reçu le *prix Wolf 2007* en Israël et le *Japan Prize* au Japon, prix considérés comme équivalents au Nobel dans ces pays.

Il a, enfin, partagé avec son collègue allemand Peter Grünberg le Prix Nobel de Physique 2007, en reconnaissance de la haute valeur scientifique de ses travaux.

La *GMR* permet de réaliser des têtes de lecture magnétiques qui équipent aujourd'hui tous les disques durs d'ordinateurs.

En France, le *CNRS* et le *CEA* se sont fortement impliqués dans le secteur dès les années 70, avec des résultats notables.

Pour dynamiser les travaux dans le secteur des nanosciences et nanotechnologies, les pouvoirs publics ont mis en place, en 1999, le *Réseau National de Micro-Nanotechnologies (RMNT)* et, plus récemment un *Réseau National en Nanosciences et en Nanotechnologies (R3N)*.

Les thématiques retenues, pour l'instant, sont les suivantes :

- *Les Nanobiosciences.*
- *Les Nanomatériaux.*
- *La Nanoélectronique.*

Pour compléter le soutien apporté aux Nanosciences, et parallèlement aux créations nationales, la direction de la Recherche à l'Éducation Nationale

a mis en place, en liaison avec le CNRS, le CEA et la Délégation Générale de l'Armement, des Centres de compétence baptisés C'Nano. Ils sont (pour l'instant) au nombre de cinq :

- Le C'Nano Ile-de-France.
- Le C'Nano Nord-Ouest.
- Le C'Nano Grand Sud-Ouest.
- Le C'Nano Rhône-Alpes.
- Le C'Nano Provence-Côte d'Azur est en instance de création.
- *Le C'Nano Grand Est qui concerne la Lorraine, l'Alsace, la Franche-Comté, la Champagne et les Ardennes.*
- Le C'Nano Provence-Côte d'Azur est en instance de création.

III - Les nanotechnologies dans l'Est et en Lorraine

Afin de bien montrer que notre région est en pointe et le restera pour peu que les politiques et les industriels locaux accompagnent les chercheurs, nous allons faire la liste des projets de *l'Institut Jean Lamour* (ARTEM) :

- Utilisation de matériaux nouveaux.
- Fabrication de capteurs magnétiques intégrés de conception nouvelle.
- Fabrication de nouveaux capteurs de contrainte, interrogeables à distance et fonctionnant sans alimentation interne.
- Interactions avec le vivant.
- Microréacteurs et microfluidique (Usine chimique du futur).

L'aspect philosophique

I - Les deux démarches de l'ingénierie

La première démarche est de conception classique. Elle consiste à concevoir et à construire des structures dont le comportement reproduira uniquement et strictement les *fonctionnalités* qui sont jugées désirables. Partant de l'échelle macroscopique, on descend alors vers l'échelle mésoscopique :

C'est la démarche que nous avons qualifiée de descendante ou "top down".

Cependant, en 1948, à propos du projet cybernétique, Von Neumann a introduit une nouvelle conception de l'ingénierie qui tend à devenir aujourd'hui dominante :

Dans cette nouvelle démarche l'ingénieur ne cherche nullement à maîtriser sa machine. Il joue sciemment et délibérément à l'apprenti sorcier. Il va considérer, en

effet, que son entreprise sera d'autant plus couronnée de succès que le dispositif qu'il aura conçu et construit aura un comportement inattendu ou surprenant.

Dans cette nouvelle démarche on part de l'échelle nanométrique pour aboutir à l'échelle macroscopique :

Cette autre démarche qui est essentiellement celle des nanotechnologies n'est pas autre chose que la démarche que nous avons qualifiée d'ascendante ou "bottom up" que l'on appelle encore ingénierie inverse (inverse engineering).

II - Nanosciences, nanotechnologies et évolution

En prenant en compte l'évolution technologique humaine, dans le processus global de l'évolution, on pouvait considérer jusqu'ici que cette évolution conservait des traits darwiniens, disons plutôt *néodarwiniens*.

Mais certains philosophes des sciences n'ont pas hésité à aller plus avant en considérant que *l'évolution changeait de nature et de rythme* à partir du moment où l'homme pouvait en prendre le contrôle, en particulier avec les nanotechnologies.

Celui-ci devient en effet capable, par le biais de celles-ci, de programmer, voire de reprogrammer l'évolution.

Une récente illustration de cette possibilité se situe dans l'action des biologistes qui semblent avoir enrichi l'alphabet du code génétique en synthétisant des protéines qui n'existent pas dans la nature.

Quoi qu'il en soit on trouve indéniablement, dans le projet nanotechnologique, le reflet d'une nouvelle ambition de l'homme, celle de se vouloir, en quelque sorte, l'ingénieur des processus évolutifs.

Risques et dangers

I - L'attitude des scientifiques

C'est le *Forsight Institute* de Drexler qui demeure le lieu privilégié, aux USA, où s'affrontent les *optimistes et les pessimistes*. Les premiers croient en l'avènement des nanotechnologies sous leur forme la plus révolutionnaire et par conséquent aux dangers graves qui peuvent s'y attacher. Les autres pensent que cet aboutissement est un leurre et veulent, de ce fait, ignorer la plupart des dangers qui en résulteraient.

La vraie question que se pose est donc la suivante : les nanorobots, tels qu'imaginés par Drexler seront-ils, un jour, une réalité ?

La montée en puissance des nanotechnologies, au cours des années 90 avait suscité des réactions négatives, en particulier celle du Prince Charles, par crainte des conséquences de l'autoréplication de ces nanorobots.

La controverse, aux USA, a opposé violemment Eric Drexler et Richard Smalley, ce dernier déclarant au premier dans une lettre ouverte :

“Vous et vos collaborateurs vous nous avez effrayé. Je n’attends certes pas de vous que vous arrêtiez vos travaux mais j’espère que d’autres scientifiques se joindront à moi pour éclairer le débat et montrer à nos enfants que même si, dans l’avenir, de réels dangers pourront se manifester dans le monde, il n’y aura jamais de monstres tel que le nanorobot auto-répliquant de vos rêves”.

La réponse de Drexler fut aussi énergique. Toutefois sans abandonner les principes de base de sa technologie moléculaire, il semble qu’il ait omis d’évoquer la possible auto-réplication des nano-assembleurs, soucieux, semble-t-il, de rassurer le public et de donner une publicité positive à ses activités.

Dans notre pays aussi les avis sont partagés quant à l’avenir du nanomonde. C’est ainsi que la Directrice d’un important projet *du CEA* a écrit à ses collègues : *“Je ne pense pas qu’un scientifique normal se reconnaisse dans les visions de Drexler”.*

Il faut donc en conclure que le Directeur du Département *“Sciences Physiques et Mathématiques”* du CNRS, éminent physicien, spécialiste des semi-conducteurs et l’un des promoteurs les plus éclairés des nanosciences en France, est un scientifique anormal. En introduction à un numéro spécial du Journal du CNRS de l’été 2002, consacré au Nanomonde, il déclarait, en effet :

“L’œuvre d’Eric Drexler m’a beaucoup influencé. J’ai acheté 25 exemplaires d’un de ses livres “Engines of creation”, pour que chacun des membres de mon laboratoire le lise”.

Il convient, d’ailleurs, de rappeler que les progrès de la technologie ont souvent dépassé toutes les prévisions. Pour l’exemple nous rappellerons un épisode bien connu de l’histoire de l’électronique :

Lors de l’apparition, dans les années cinquante, des premiers transistors, qui auront révolutionné l’électronique et, en particulier, la conception et la construction des ordinateurs, un comité d’experts du plus haut niveau scientifique fut mis en place aux USA et consulté par différentes instances. Ce comité fit la prédiction suivante concernant, en particulier, l’évolution, de l’informatique et des ordinateurs :

“C’est bien, on va arriver, à la fin du siècle à faire 5 000 opérations par seconde, avec un appareil de 5 000 livres qui consommera quelques centaines de kilowatts”.

Le même comité affirmait qu'on aurait besoin au maximum d'une dizaine d'ordinateurs aux Etats-Unis à horizon du XXI^{ème} siècle.

On peut constater à quel point les meilleurs augures peuvent se tromper quand ils se risquent à des prédictions de ce type, car *le progrès scientifique procède plutôt par mutation* et, dans le cas évoqué, c'est l'avènement de la *microélectronique* et des *réseaux*, imprévisible à l'époque, qui a faussé les prévisions.

II - Les problèmes d'éthique

Dans ce secteur l'éthique couvre un champ multidisciplinaire aussi vaste que complexe.

Certes on sait que les nanoparticules peuvent présenter un réel danger pour les populations. Toutefois la thérapeutique du futur, inhérente à la "nanomédecine", laisse entrevoir de telles possibilités qu'il serait dommageable de les négliger.

Par ailleurs les tenants de ce nouveau secteur, ingénieurs, techniciens, chercheurs et industriels ont rapidement compris que leur activité pouvait non seulement être préjudiciable à la santé humaine, mais aussi, éventuellement, porter atteinte aux libertés individuelles en raison de l'ampleur des moyens technologiques mis en œuvre et cela dans une discrétion quasi absolue.

Cette attitude responsable tranche nettement avec le comportement observé dans d'autres secteurs de l'activité scientifico-industrielle (OGM).

A ce jour certains dangers et risques sont plus ou moins identifiés. Nous en rappellerons quelques uns.

A. Les nanoparticules et les effets biologiques

Le premier danger vient de la *prolifération des nanoparticules*, comme les *fullérènes* et les *nanotubes*, présentes désormais, dans de multiples secteurs industriels. Avec le développement des nanotechnologies, en effet, de grandes quantités de ces *nanoparticules*, aux propriétés physico-chimiques très diverses, et encore mal connues, vont être produites et répandues, notamment au voisinage des lieux de production.

Mais les risques sanitaires concernent aussi bien les travailleurs de ce secteur que la population en général et cela d'autant plus que les moyens de protection comme les *filtres*, communément utilisés pour les microparticules, sont inopérants pour les nanoparticules.

S'il convient donc de mettre en œuvre des moyens de contrôle et de protection adapté, il est urgent de résoudre, en premier lieu, le problème de traçabilité de ces nanoparticules.

On sait d'après les connaissances toxicologiques actuelles que les nanoparticules se déposent dans les *voies pulmonaires* pouvant, de là, passer dans les *circuits lymphatiques* et s'infiltrer dans tous les organes : foie, rein, cœur et même cerveau *par rupture des barrières biologiques au niveau cellulaire*. Les effets pathologiques, parfois bénins, peuvent aussi revêtir, quelquefois, une certaine gravité.

Mais il faut toutefois préciser que ces dangers concernent les nanoparticules "libres". Leur piégeage dans une matrice (polymère, composite, nanostructures électroniques, etc.) rend les risques d'exposition quasi-négligeables.

Ce sont donc d'abord les personnels de laboratoire et de production dont il est indispensable d'assurer la protection.

B. Les dangers liés à la biodégradabilité

S'ils ne présentaient qu'un faible *taux de biodégradabilité*, certains nanomatériaux ou certaines nanoparticules pourraient alors majorer considérablement la gravité des problèmes de pollution écologique et de toxicité humaine.

A cet égard le Comité Consultatif d'Éthique signale que l'inclusion de nanoparticules non dégradables dans les *macrophages*, c'est-à-dire dans les cellules destinées à capturer les antigènes, pourrait constituer une source d'inquiétude supplémentaire.

C. Dangers inhérents à d'éventuelles propriétés nouvelles

Il n'est pas impossible que certains matériaux nanostructurés, ayant subi des traitements complexes, puissent présenter des propriétés, pour l'instant inconnues, mais susceptibles de se révéler dangereuses, à l'échelle *anthropomorphique*, quant à leur réactivité biologique ou chimique. Mais il apparaît, alors, difficile de prévoir et d'étudier les éventuels effets secondaires inhérents à de telles transformations, s'agissant d'une *matière nouvelle* dont on ignore, encore, à peu près tout. On se trouve ici dans une situation identique, a priori, à celle qu'ont connu les physiciens avec la radioactivité, au début de son étude.

Ce n'est qu'après avoir mis en évidence les propriétés nouvelles que l'on pourra parler de *traçabilité*.

Toutefois les nanomatériaux, contrairement aux isotopes radioactifs, ne présentent de propriétés nouvelles qu'au travers de leur structure. Les risques ne peuvent donc guère exister que lors de la production ou de la dégradation de ces nanosubstances.

D. Autres risques

On peut identifier d'autres risques liés aux nanotechnologies, mais en association avec la robotique et le génie génétique qui lui sont étroitement liés.

Ces risques ne sont toutefois fondés, pour l'essentiel, que dans la mesure où les nanotechnologies connaîtraient leur plein aboutissement.

Nous ne les citerons qu'en raison des fantasmes développés dans le public par certains ouvrages de science-fiction, qui ont largement contribué à y développer crainte et hostilité.

1. *Ecophagie globale spontanée*

Les propriétés auto-organisatrices des nanomachines pourraient les conduire à une *autoréplication sauvage incontrôlée* en cas d'accident ou d'erreur de programmation.

Ce risque a reçu le nom d'*écophagie globale*, car il correspondrait vraisemblablement à la destruction de la biosphère par épuisement de son carbone, celui-ci étant complètement absorbé par l'autoreproduction des *nano-engins*.

Néanmoins, d'après des études sérieuses, la probabilité de ce risque semble relativement faible. (Voir le roman de *Michaël Crichton* : *'La proie'*).

2. *Ecophagie globale provoquée*

Par contre la probabilité qu'une telle *écophagie* puisse être provoquée dans un conflit, apparaît beaucoup plus grande. Il est clair d'ailleurs que le développement des *nanotechnologies* peut apparaître, sous certains aspects, comme un nouvel épisode de *la course aux armements*.

3. *Dangers sociaux, économiques et politiques*

Un autre danger réside dans les bouleversements *sociaux, économiques et politiques* qui accompagneraient l'avènement éventuel des nanotechnologies sous leur forme la plus révolutionnaire. Ce développement signifierait la fin de toute pénurie en *énergie et matières premières*.

Mais dans la mesure où même les régions les plus déshéritées pourraient subvenir, alors, à tous leurs besoins et devenir complètement autarciques, ne serait-ce pas la *fin du commerce et des échanges internationaux* ?

Par ailleurs l'opposition entre une *aristocratie technocratique*, détentrice des technologies, dont l'émergence serait inévitable, et une masse populaire réduite à une certaine oisiveté ne risquerait-elle pas d'engendrer divers troubles ?

4. *Le danger éthique et moral*

Un autre type de danger apparaît à un niveau que l'on peut qualifier d'*éthique* voire de *moral*.

Les nanotechnologies, dans leur aboutissement ultime, pourraient permettre à l'homme d'exercer sur la nature un pouvoir immense et même exorbitant. Ne conviendrait-il pas, alors, *de définir des normes nouvelles visant à orienter voire à limiter l'action humaine ?*

Dans l'affirmative quelle autorité serait, alors, assez puissante pour imposer des règlements raisonnables ?

5. *Risque "épistémologique"*

Ce n'est pas véritablement un danger mais plutôt un bouleversement inhérent à l'introduction des nanosciences et des nanotechnologies dans la somme des connaissances humaines. Ce bouleversement affecterait considérablement le classement actuel des sciences.

6. *Les frontières*

Les succès éventuels des nanotechnologies, parallèlement à ceux des sciences associées, risqueraient de *brouiller les frontières* existant, encore à ce jour, entre d'une part le monde de la nature, de la vie ou de l'esprit et d'autre part celui des machines et des mécanismes.

Or ce sont ces frontières qui donnent encore un sens à la condition humaine.

Drexler et ses disciples, conscients des craintes ainsi exprimées, affichent la conviction que l'intelligence humaine est parfaitement capable de faire face à ces difficultés.

Ils estiment même que cette intelligence, en perpétuelle évolution, est capable de rééditer les exploits réalisés par la nature et la vie au cours de millions d'années.

Cette attitude n'est pas sans être quelque peu prétentieuse car l'évolution a tout de même produit, entre autres choses, le cerveau humain.

Il n'en demeure pas moins que ce n'est que *l'avènement maximaliste* des nanotechnologies, tel que nous l'avons décrit et tel que le conçoit Drexler, qui pourrait alors dispenser à la race humaine, une maîtrise inédite et incontestable sur l'existant naturel et vivant.

On conçoit que le risque se situe, alors, au plan métaphysique.

7. La prévention de ces risques

Un dernier type de risque réside dans la difficulté que l'on rencontrerait fatalement dans la mise en place d'un "garde-fou" pour faire obstacle aux divers risques précédemment énumérés. Mais il s'agit, ici, d'affronter un problème nouveau.

En effet la dynamique qui porte les nanotechnologies s'appuie sur deux puissances l'une et l'autre irrésistibles, d'une part la *concurrence économique* à l'échelle mondiale et, d'autre part, la *course aux armements*, l'une et l'autre pour la première fois en synergie.

En effet *la force des intérêts privés* est beaucoup plus présente ici qu'elle ne l'a jamais été, par exemple, pour le nucléaire.

Mais il apparaît évident que toute tentative de régulation des phénomènes liés à l'émergence des nanotechnologies ne pourra aboutir qu'à une échelle mondiale.

Que nous réservent les nanoscientifiques et autres nanotechnologues ? Sont-ce les nouveaux et redoutables démiurges ou plus simplement des illusionnistes qui nous auront permis de tenter de vous divertir un instant, fut-ce celui d'une conférence ?



Bibliographie

L'importance et le nombre des travaux effectués dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies est tel que les ouvrages et publications se comptent par milliers. Nous n'en avons indiqué ici que quelques-unes parmi celles qui nous semblent être parmi les plus probantes.

1. *Marcel Lahmani, Claire Dupas et Philippe Houdy* : Tome I. Les nanosciences, nanotechnologies et nanophysique. Belin 2004 Collection "Echelles".
2. *Marcel Lahmani, Catherine Bréchnignac et Philippe Houdy* : Tome 2. Nanomatériaux et Nanochimie. Belin 2006.
3. *Marcel Lahmani, Patrick Boisseau et Philippe Houdy* : Tome 3. Nanobiotechnologies et nanobiologies. Belin 2007.
4. *Eric Drexler* : Engins de création. L'avènement des nanotechnologies. Vuibert. 2005.
5. *F. Besenbacher* : Scanning tunnelling microscopy studies of metal surfaces. Rep. Prog. Phys. N°59, 1996.
6. *J. A. Stroscio et M.J. Kaiser* : Scanning tunnelling microscopy, n° 27 Academic Press, San Diego, 1993.

7. *Lecoanet H., Dauchez P., Wiesner M.* : Quelques pistes de recherche sur le comportement des nanotubes de carbone dans les eaux de surface. Rapport d'étude, Nov 2001. Ambassade de France à Washington.
8. *H. Kroto* : Nanoeterscale Architecture . Proceedings of the* second international symposium in nanoarchitectonics using suprainterationics. University of California. Los Angelès 2002.
9. *Corvest V., Sigalat C., Haraux P.* '2007 : An insight into the bind-lock m-echanism of the yeast mitochondrial ATP synthase inhibitory peptide
10. *Contessi S., Haraux F., Mavelli I., Lippe G., (2005)* : Identification of a conserved calmodulin-binding motif in the sequence of $F_0 F_1$ ATP synthase inhibitor protein. *J. Bioenerg. Biomembr.* 37,317-326.
11. *Santolini J., Haraux F., Sigalat C., Munier L., André F. (1998)* : Interaction between high and low affinity tentoxin binding sites in chloroplast F1-ATPase revealed by synthetic analogues. *J. Biol. Chem.* 273,3343-3350
12. *Balzani V., Credi A., Silvi, Venturi M.* : *Chem. Soc. Rev.* 2006, 35, 1135.
13. *Sauvage J.-P.* : *L'actualité Chimique* 2003, 4-5 , II9.
14. *Schill G.* : *Catenanes , Rotaxanes and Knots*, 1971, Academic Press.
15. *Vickers M. S. Beer P. D.* : *Chem. Soc. Rev.*, 2007, 36, 211.
16. *Christian Joachim et Laurence Prévert* : *Nanosciences. La révolution invisible.* Seuil 2008.
17. *Williams Sims Bainbridge* : *Nanoconvergence. The unity of nanoscience biotechnology, information technology and cognitive science.* Prentice Hall 2007.
18. *Jim Gimzewski et Victoria Vesna* : *Le syndrome nanomémique.* Technoetic Arts (2003).
19. *H. Kroto* : Nanoeterscale Architecture. Proceedings of the second international symposium in nanoarchitectonics using suprainterationics. University of California. Los Angelès 2002.
20. *Hayles H. K.* : *Nanoculture. Implications of the new technoscience.* Intellect Books, Bristol, Portland 2004.
21. *Jones R.* : *Soft Machines, Nanotechnology and life.* Oxford University Press, 2004.
22. *Markus Krummenacker and James Lewis* : *Prospects in nanotechnology : towards molecular manufacturing,* Wiley, 1995.
23. *D.B. Kittelson* : *Engines and nanoparticles ; a review.* *J. Aerosol Sci.* 29 (1998) 575-588
24. *R. Freitas* : *Robots in the bloodstream : the promise of nanomedicine.* Novartis Journal Pathways. Dec 2001.

25. *Dupuy J.P. Roure F* : Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle. Conseil Général des Mines, 2004.
26. *M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas* : Giant magneto-resistance in Fe(001)/Cr(001) superlattices. *Phys.Rev. Letters* 61,2472 (1988).
27. *T.Valet, A. Fert* : Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnets multilayers. *Phys. Rev.B* 48, 7099 (1993).
28. *A. Fert, H. Jaffres* : Condition for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor. *Phys.Rev. B* 64,184420(2001).
29. *A. Campbell et A. Fert* : Transport properties of ferromagnets. *Ferromagnetic materials* ; Eds North Holland (1982)
30. *A. Fert et P. Bruno* : Interlayer coupling and magnetoresistances in multilayers. *Ultrathin Magnetisstructures*. EDS. Springer Verlag (1994)
31. *A. Barthélémy, A. Fert et F. Petroff* : Geant magnetoresistance of magnetics multilayers . *Handbook of magnetic materials*. EDS Elsevier (1999).
32. *Comité Consultatif National d'Ethique pour les sciences de la vie et de la santé* : Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé .Avis n° 96. Février 2007.
33. *Dupuy J.P. Roure F* : Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle. Conseil Général des Mines, 2004.
34. *Avis du Comité Ethique du CNRS* sur les enjeux éthiques des nanosciences et des nanotechnologies. Octobre 2006 (Publications du CNRS).
35. *Académie de sciences, Académie des technologies* : Nanosciences, nanotechnologies. Rapport sur la science et la technologie n° 18. Edition Tec. et Doc., 2004.
36. *Mission scientifique et technique du ministère délégué à la recherche* : Nanosciences et Nanotechnologies. Une réflexion prospective. MSTP-mai 2005.
37. *Crichton M.* : La Proie , R.Laffond, Paris, 2003 (Prey 2002).