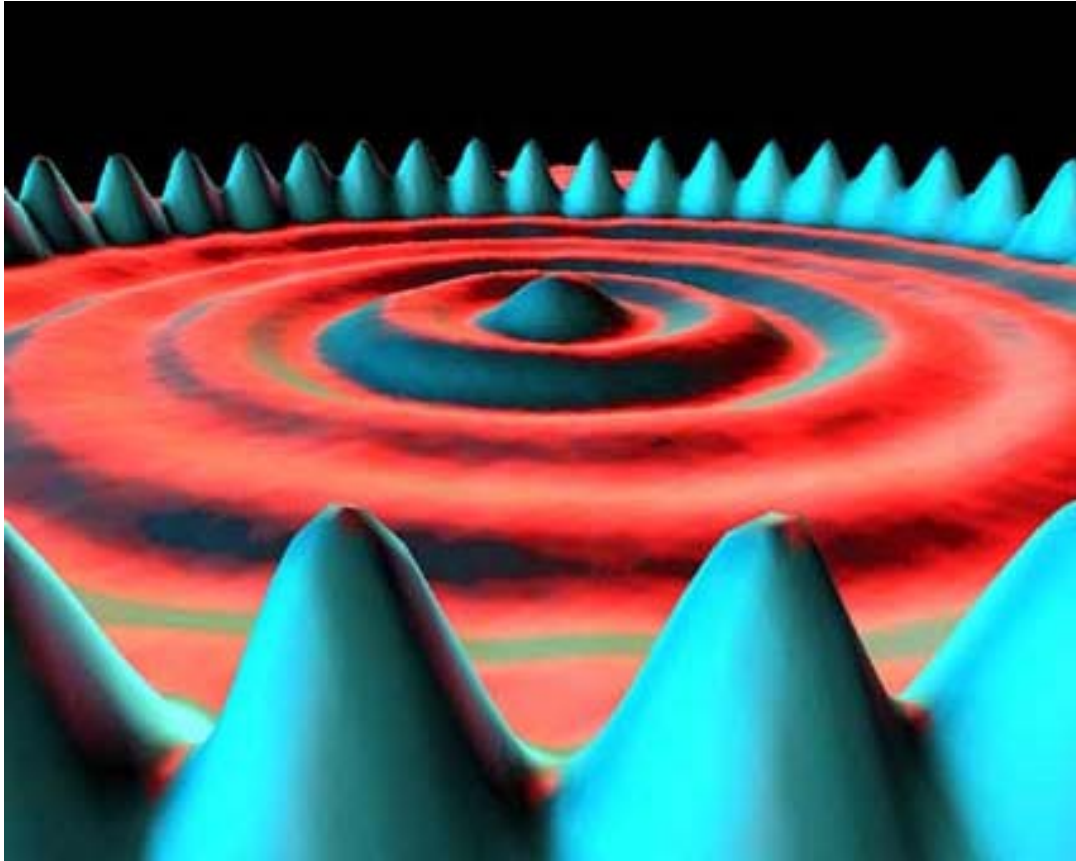


Bienvenue dans le nanomonde ?



© IBM Almaden

Elles constituent sans doute la prochaine révolution scientifique et industrielle. « Elles », ce sont les nanotechnologies, un ensemble de techniques révolutionnaires visant à manipuler la matière atome par atome, comme les briques d'un jeu de Lego. Objectif : repousser les limites de la miniaturisation, créer de nouveaux matériaux aux propriétés insoupçonnées et, peut-être, mettre au point des myriades de robots microscopiques chargés de produire à grande échelle des biens de consommation. Rien que ça !

Peu connues du grand public, les nanotechnologies sont aujourd'hui en plein essor - en témoignent les budgets de recherche colossaux débloqués aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Aucune grande puissance ne veut louper le coche, les applications industrielles étant potentiellement gigantesques. Mais les risques - militaires, sanitaires, environnementaux - des nanotechnologies sont à la hauteur des espoirs qu'elles suscitent. Faut-il avoir peur de la nanorévolution ? Voyage au cœur du minuscule, entre fascination aveugle et diabolisation forcenée.

« Charbon et diamant, sable et microprocesseur, cancer et tissu sain : à travers l'histoire, les différents arrangements des atomes ont fait la différence entre ce qui est bon marché et ce qui est précieux, entre maladie et bonne santé. Assemblés d'une manière, les atomes forment le sol, l'air et l'eau ; assemblés d'une autre, ils donnent des fraises mûres. Assemblés d'une façon, ils constituent nos maisons et l'air pur, assemblés d'une autre, ils sont cendres et fumées. » Dès les premières lignes de son livre culte « Les engins créateurs », paru en 1986, l'ingénieur étasunien Eric Drexler suggère déjà l'objectif ultime des nanotechnologies : quand l'homme sera capable de manipuler très précisément la matière atome par atome, à la manière d'un jeu de Lego, il pourra produire n'importe quel objet ou matériau - un appareil-photo, une planche de bois, une voiture, etc. - à partir des atomes qui constituent cet objet ou ce matériau.

Pour y parvenir, Drexler prévoit le développement futur d'« assembleurs moléculaires » - les fameux engins créateurs -, dont il décrit en 1992 les principes de fonctionnement dans « Nanosystems », ouvrage qui vulgarise sa thèse de doctorat réalisé au célèbre MIT (Massachusetts Institute of Technology) de Boston. Ces « assembleurs » seront en fait de minuscules robots-ouvriers chargés d'assembler atomes et molécules. Leur taille se mesurera, comme les atomes et les molécules, en nanomètres (milliardèmes de mètre ; lire [« Plongée au cœur de l'infiniment petit »](#)). Pour produire des résultats concrets et rapides, ces nano-ouvriers devront être suffisamment nombreux - des milliards en fait - et donc être capables de s'auto-répliquer...

Science-fiction ? Pour le prix Nobel de chimie Richard Smalley, cela ne fait aucun doute (1). Mais pour de nombreux nanotechnologues, les projections théoriques de Drexler se réaliseront inéluctablement. Ainsi le « gourou » de l'intelligence artificielle, Ray Kurzweil, estimait-il le 9 avril 2003 devant la commission scientifique de la Chambre des représentants étasuniens que *« le consensus actuel est que le nano-assemblage est en fait réalisable, bien que ses potentialités les plus spectaculaires ne se concrétiseront que d'ici deux décennies »*. L'Histoire tranchera.

« Plein de place en bas »

Si Drexler a théorisé et popularisé les nanotechnologies, celles-ci sont pourtant « nées » lorsqu'il n'avait que quatre ans, fin 1959 lors d'un congrès de l'American Physical Society. Dans une conférence visionnaire au titre iconoclaste – « Il y a plein de place en bas » –, le physicien et prix Nobel Richard Feynman constatait déjà que les principes de la physique *« n'interdisent pas la possibilité de manœuvrer la matière atome par atome. Ce n'est pas une tentative pour violer une quelconque loi ; c'est quelque chose qui, en principe, peut être réalisé mais qui n'a jamais été fait en pratique parce que nous sommes trop grands. »* (2)

Trop grands ? Plus aujourd'hui ! Armés de leurs microscopes à « effet tunnel » ou à force atomique, les scientifiques sont maintenant capables de manipuler et déplacer les atomes un à un (lire [« Trois lettres qui en disent long »](#)). Certains ont même déjà construit des objets de taille nanométrique qui pourraient bien constituer les éléments de base des nanomachines drexleriennes de demain. Citons par exemple la « roue moléculaire » (2 nanomètres de diamètre), inventée en 1998 entre Toulouse et Zurich, et qui tourne à plus d'un million de tours par minute. Ou encore le « moteur moléculaire » du chercheur étasunien Carlo Montemagno : assemblé en 2000, ce moteur de 12 nanomètres de haut transforme de l'énergie chimique en mouvement en exploitant les

propriétés d'une enzyme naturelle. Ces percées récentes, et bien d'autres encore, font que les « visions » de Drexler, accueillies au départ avec scepticisme voire ironie par la communauté scientifique, sont à présent reconsidérées d'un autre œil par nombre de ses détracteurs.

Convergence et multidisciplinarité

Une chose est sûre, en tout cas : les nanotechnologies fascinent. Pour la première fois, elles repoussent les limites de l'ingénierie jusqu'à l'échelle atomique, frontière commune où plusieurs disciplines traditionnelles - chimie, physique, biologie - convergent avec l'informatique. Les scientifiques s'émerveillent des nouvelles propriétés que la matière acquiert dans le nanomonde et fantasment à l'idée de pouvoir, un jour, reproduire et exploiter la nanomachinerie complexe à l'œuvre dans les organismes vivants (lire [« Une vraie révolution scientifique »](#)).

Aujourd'hui, il faut se rendre à l'évidence : la « nanorévolution » est bel et bien en marche. Le nombre de publications, de brevets et de crédits consacrés à ce qui est « nano » grimpe en flèche depuis dix ans. En 2001, plus de 7.000 citations d'articles relatifs aux nanotechnologies ont été recensées dans la littérature scientifique. En 2002, on en comptait plus de 12.000. Le nombre de brevets déposés explose également - à un point tel, d'ailleurs, que certains craignent qu'ils ne verrouillent le développement du secteur. Côté budgets, on estime qu'environ 3 milliards d'euros (publics et privés) seront dépensés en 2003 pour la recherche et le développement nanotechnologiques dans le monde, principalement aux Etats-Unis, au Japon et en Europe (3). Outre-Atlantique, les nanotechnologies sont même en passe de devenir le programme scientifique le mieux financé par les pouvoirs publics depuis la « course à l'espace » des années 50 et 60 ! Dans ce contexte, notons que la Région Wallonne n'est pas en reste : elle vient de lancer un ambitieux programme de recherche qui, en terme d'effort budgétaire par habitant, dépasse les moyens alloués par les Etats-unis à leur National Nanotechnology Initiative - l'organe créé en 2000 par Clinton pour coordonner et mener la « *prochaine révolution industrielle* » à bon port.

Destruction créative

Tous les observateurs attentifs s'accordent pour dire que les nanotechnologies auront des applications extrêmement larges, affectant tous les secteurs de l'économie : micro-électronique et informatique, énergie, transports, agriculture, industrie pharmaceutique, défense et armement, textile, etc. La communauté financière est d'ailleurs en train de prendre la mesure de leur impact potentiel sur l'économie mondiale. Ainsi la grande banque d'affaires Crédit Suisse First Boston explique-t-elle, dans une analyse destinée aux investisseurs (4), que la nanotechnologie est une « *technologie à usage généralisé, (...) comme le moteur à vapeur, l'électricité et le chemin de fer* ». Et de rappeler que toutes les nouvelles technologies à usage généralisé précédentes ont rapidement entraîné des bouleversements économiques considérables via la « destruction créative », « *processus par lequel une nouvelle technologie ou un nouveau produit fournit une solution meilleure et entièrement nouvelle, avec pour conséquence le remplacement complet de la technologie ou du produit antérieur. Les investisseurs doivent s'attendre non seulement à ce que la destruction créative se poursuive, mais probablement aussi à ce qu'elle s'accélère, la*



Ce nanomoteur hybride, « bricolé » en 2000 par l'équipe de Carlo Montemagno, ne fait que 12 nanomètres de haut ! Les six « œufs allongés » sont des enzymes qui utilisent le même carburant que nos cellules (l'adénosine triphosphate ou ATP) pour faire tourner la pale. © Cornell University

nanotechnologie étant son moteur. » Pragmatiques, les auteurs estiment qu'avec l'avènement de la nanorévolution, « *la majorité des compagnies aujourd'hui cotées sur le Dow Jones ne seront vraisemblablement plus là dans vingt ans.* ». L'US National Science Foundation (l'agence gouvernementale étasunienne chargée de promouvoir les sciences et les technologies) estime quant à elle qu'en 2015, le chiffre d'affaires global généré par les nanotechnologies devrait excéder les mille milliards de dollars par an. On peut certes douter de la pertinence de cette estimation, mais pas de l'importance des nanotechnologies dans le futur...

Fin de la modernité ?

« En forçant à peine le trait, ce qui est anticipé est la fin de la rareté, la fin du travail et la fin du commerce – donc la fin du libéralisme et du capitalisme, et, peut-être, celle de la démocratie », estime Jean-Pierre Dupuy, professeur de philosophie sociale et politique à l'Ecole Polytechnique (Paris) et à l'Université Stanford (Californie). *« Fin de la rareté, dans la mesure où il ne sera plus nécessaire d'exploiter les ressources fossiles ou minières pour assurer l'approvisionnement en énergie et en matières premières ; fin du travail, dans la mesure où la robotique et la nanorobotique nous dispenseront, nous humains, de dépenser notre énergie métabolique et, peut-être, mentale ; fin du commerce dans la mesure où les régions, même actuellement les plus déshéritées, pourront devenir autarciques. »* (5)

Mais ne nous emballons pas. Même si les nanotechnologies se développent aujourd'hui à vive allure, nous ne sommes actuellement que dans la première phase de la nanorévolution : celle de la production industrielle de nanoparticules (éléments purs et composés chimiques simples). On utilise déjà celles-ci dans la fabrication de produits tels que crèmes solaires, tissus anti-taches, vitres auto-nettoyantes, murs anti-graffiti, etc. Ces particules nanométriques, dont les plus étonnantes sans doute sont les buckyballs et les nanotubes (lire « [Petits mais costauds !](#) »), permettent d'obtenir des matériaux plus solides, plus légers, plus propres et plus « esthétiques ».

Selon l'ETC Group, une organisation non gouvernementale qui a récemment publié un rapport très fouillé sur les nanotechnologies (6), nous sommes en train de pénétrer tout doucement dans la seconde phase du développement « nanotech » : celle de la « *nanofabrication* ». Objectif : assembler des nano-objets (tels la roue et le moteur moléculaires évoqués plus haut) susceptibles de se retrouver dans les nanomachines de demain. Celles-ci devraient à leur tour permettre d'aboutir à la « *manufacture moléculaire* » (phase 3), c'est-à-dire la vision dextrélienne dans laquelle des nanorobots autoréplicateurs sont chargés de produire à grande échelle n'importe quel bien de consommation.

Exploiter le vivant

Si la mise au point de ces nanomachines autoréplicatrices se révélait finalement irréalisable, d'autres options restent possibles pour révolutionner la production de masse, avertit l'ETC Group. « *La voie la plus prometteuse pourrait être d'exploiter et de réorienter l'activité de nanomachines qui existent déjà dans la nature* ». C'est déjà le cas à l'échelle des micro-organismes : depuis une quinzaine d'années, ce sont des armées de bactéries génétiquement modifiées qui produisent en quantités quasi-industrielles l'insuline humaine dont les diabétiques ont tant besoin. Mais demain, *qui* ou *quoi* produira *quoi* ? Nanotechnologies et biotechnologies sont actuellement en train de fusionner pour former ce que l'on appelle déjà les « nanobiotechnologies ». Suite à la découverte, l'an dernier, qu'il est possible d'enrichir le code génétique de « lettres artificielles » afin de produire des protéines qui n'existent pas dans la nature (7), il y a fort à parier que les

nanobiotechnologies joueront un rôle important sur le chemin qui mènera, peut-être un jour, à la manufacture moléculaire...

Cet « enrichissement » artificiel de l'ADN entrouvre déjà la porte de la « *nanotechnologie bionique* ». Selon l'ETC Group, cette quatrième phase du développement nanotech célébrera les noces du biologique et du synthétique, de l'homme et de la machine. Et ce, bien sûr, aux confins de la matière. « *La question aujourd'hui n'est pas de savoir s'il est possible de produire des mécanismes hybrides vivant/non vivant, mais quelle est la meilleure stratégie pour accélérer leur développement* », estime Carlo Montemagno (8), professeur d'ingénierie biomédicale à l'Université de Californie à Los Angeles, et père du premier « moteur moléculaire » précédemment évoqué.

Aujourd'hui, nous n'avons qu'un avant-goût partiel de cette alliance du biologique et du synthétique, déjà consacrée à l'échelle « macro » avec les porteurs de pacemakers ou de prothèses osseuses. Demain, des nanomatériaux parfaitement tolérés par l'organisme, combinés ou non à des dispositifs micro-électroniques, devraient permettre de réaliser de nouvelles prothèses parfaitement biocompatibles, plus légères et plus efficaces. Voire des micro-prothèses capables de modifier des processus biochimiques et cellulaires - un globule rouge artificiel par exemple... (lire [« Les promesses de la nanomédecine »](#)).

Grise ou verte, la gelée ?

Evidemment, comme toute nouvelle technologie, les nanotechnologies charrient des risques à la hauteur des espoirs suscités. Le scénario le plus noir, déjà avancé par Drexler et brandi aujourd'hui par les nanosceptiques les plus radicaux, est celui d'une prolifération incontrôlée de nanorobots autoréplicateurs. Cette menace porte un nom : l'« écophagie globale », soit la destruction de toute ou partie de la biosphère par épuisement du carbone utilisé par les nano-engins pour leur reproduction. On parle de « gelée grise » s'il s'agit de nanorobots drexlériens 100% mécaniques, de « gelée verte » si l'on fait référence à des nanorobots hybrides mi-vivants mi-machines enfantés par les nanobiotechnologies... Bigre !

Beaucoup moins « science-fictionnelles » sont les applications militaires des nanotechnologies. En mai dernier, l'armée étasunienne et le MIT inauguraient l'Institute for Soldier Nanotechnologies à Boston. Les quelque 150 chercheurs de ce centre poursuivent l'objectif très politiquement correct d'« améliorer les capacités de survie du soldat », en transformant les tenues militaires en véritables armures intelligentes, c'est-à-dire ultra-légères, résistantes aux impacts et permettant de monitorer l'état de santé du soldat (9). Plus près de chez nous, à Grenoble, le plus gros centre européen de micro et nanotechnologies (Minatec) est en train de se développer, avec l'armée française comme partenaire privilégié. Cette alliance discrète devrait contribuer « à satisfaire les besoins de la Défense pour la veille technologique, l'accès aux technologies civiles les plus avancées et l'acquisition de technologies spécifiques » (10). Mais ce que les militaires français et étasuniens ne précisent pas, c'est que les nanotechnologies vont également permettre de développer de nouvelles armes de destruction massive... (lire [l'interview d'André Gsponer](#)).

Nanoparticules toxiques ?

Aujourd'hui on mesure encore mal l'impact sanitaire et environnemental des nanoparticules fabriquées pour l'industrie. Chaque jour dans le monde, quelque deux tonnes et demie de nanotubes de carbone sont produites. Or, « les premières études de toxicité effectuées sur des rats révèlent que les nanotubes provoquent inflammations et fibroses des poumons », explique François

Huaux, chargé de recherches à l'unité de toxicologie industrielle de l'Université catholique de Louvain (Belgique). Pourtant, à l'heure actuelle, aucun protocole international n'existe pour protéger les laborantins qui les fabriquent. Après l'amiante, les nanotubes ?

Et que penser des crèmes solaires « écran total » aux nanoparticules d'oxyde de titane déjà sur le marché ? Ces particules d'une quinzaine de nanomètres de diamètre sont tellement petites qu'elles deviennent transparentes, tout en gardant leur capacité à bloquer les rayons ultraviolets. Résultat : un écran total parfaitement invisible. Séduisant. Oui, mais voilà : « *des études récentes ont montré que des particules d'un diamètre inférieur au micron, soit à 1.000 nanomètres, sont capables de traverser la peau et de rejoindre le système lymphatique* », avertit Vyvyan Howard, toxicopathologiste à l'université de Liverpool. « *D'une manière générale, on peut dire que plus les particules sont petites, plus elles sont chimiquement réactives et leurs effets toxiques. Des études in vitro ont montré que des particules ultra-fines - en-dessous de 100 nanomètres de diamètre - génèrent des radicaux libres qui accélèrent le vieillissement cellulaire.* » En-dessous de trente nanomètres de diamètre, ce qui est le cas des nanotubes et des nanoparticules d'oxyde de titane, ces particules peuvent traverser la barrière hémato-encéphalique et pénétrer dans le cerveau. Vont-elles s'y accumuler ? Et avec quels effets ? Aujourd'hui, nul ne le sait...

Un moratoire ?

Et c'est bien là le problème, estiment les nanosceptiques : sous la pression économique, la révolution nanotech suit son cours sans aucune régulation, ni de l'Etat, ni de la société civile. Va-t-on reproduire la même erreur qu'avec les biotechnologies ? Quel impact les nanoparticules vont-elles avoir sur les écosystèmes et la santé ? Quelles seront les conséquences socio-économiques de cette nouvelle révolution industrielle que l'on nous annonce ? L'échiquier géopolitique va-t-il être bouleversé ? Le fossé nord-sud va-t-il encore se creuser ? Autant de questions aujourd'hui sans réponses qui poussent des personnalités comme Bill Joy (« l'autre Bill » de la Silicon Valley, cofondateur de Sun Microsystems), Sean Howard (éditeur de la revue *Disarmament Diplomacy*) ou l'ETC Group à carrément demander un moratoire mondial sur toutes ou certaines recherches nanotechnologiques, au nom du principe de précaution. Une requête illusoire, sans doute, mais qui a le mérite d'attirer l'attention *aujourd'hui* sur les risques inhérents aux nanotechnologies. Car comme ce fut le cas avec l'énergie nucléaire et le génie génétique, la possibilité de modifier la matière à l'échelle de l'atome - dans le vivant et le non-vivant - va plus que vraisemblablement altérer non seulement nos sociétés et nos économies, mais aussi la perception que nous avons de nous-mêmes. Comment savoir où la science - et en l'occurrence les nanotechnologies - vont nous mener ? Pour Marvin Minsky, un des pères de l'intelligence artificielle et l'auteur de la préface des « *Engins créateurs* » de Drexler, « *il est curieux de constater que les tentatives [de prédiction] les plus fructueuses furent celles d'auteurs de science-fiction comme Jules Verne, H. G. Wells, Frederik Pohl, Robert Heinlein, Isaac Asimov ou Arthur C. Clarke* ». Des écrivains qui, pour la plupart, avaient une connaissance très approfondie de la science de leur époque. L'Histoire nous dira si Drexler est de la même trempe.

David Leloup

Notes

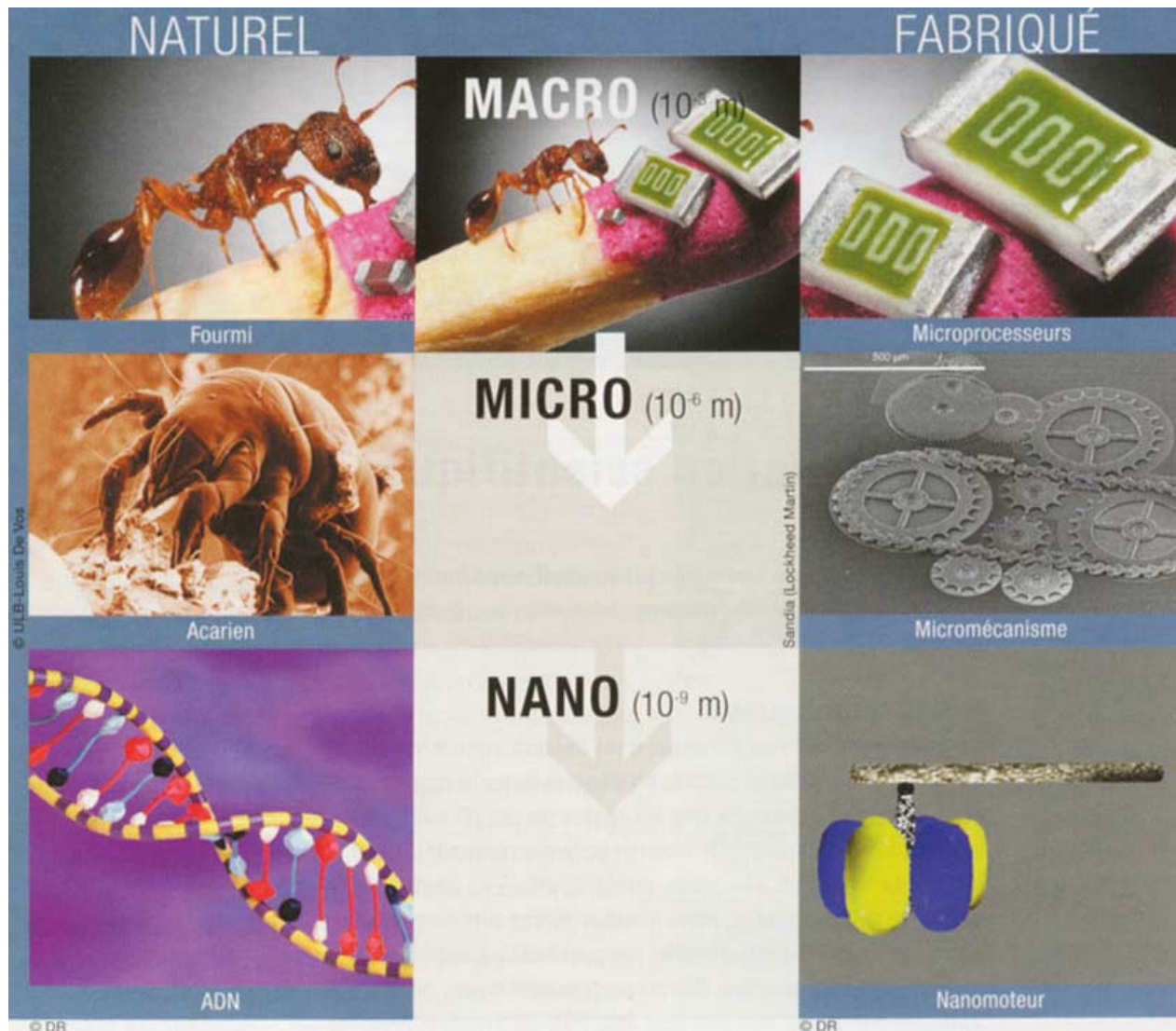
- (1) « Of chemistry, love and nanobots », *Scientific American*, septembre 2001. Le débat Drexler-Smalley évolue. Lire à ce propos <http://crnano.org/Debate.htm>
<http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>
- (2) « There's plenty of room at the bottom », www.zyvex.com/nanotech/feynman.html

- (3) « Nanotech report 2003 », www.luxcapital.com
- (4) « Big money in thinking small », cité sur www.crnano.org/dangers.htm
- (5) *L'Ecologiste*, Vol.4 (2), juin 2003, p.72.
- (6) L'ETC Group est une organisation internationale basée au Canada dont les thèmes de prédilection sont l'érosion (culturelle et environnementale), la technologie (qui transforme la société) et la concentration (du pouvoir industriel). Son rapport, intitulé « The big down », est disponible (en anglais) sur www.etcgroup.org
- (7) Notre code génétique s'écrit avec quatre lettres : A, T, C et G, les bases de l'ADN qui régissent la vie sur Terre depuis 3 milliards d'années. En 2002, des chercheurs japonais ont « enrichi » cet alphabet de deux « lettres » artificielles : S et Y, ce qui permet d'envisager la création d'organismes vivants aux propriétés insoupçonnées.
- (8) *Journal of Nanoparticle Research*, Vol.3 (1), 2001, p.3.
- (9) <http://web.mit.edu/isn/>
- (10) Communiqué de presse, novembre 2002, www.minatec.com

En savoir plus

- « Demain le nanomonde », Jean-Louis Pautrat, Fayard, 2002.
- « Nanotechnologies, la révolution de demain », Mark & Daniel Ratner, CampusPress, 2003.
- « Les nanotechnologies », Michel Wautelet et coll., Dunod, 2003.
- « Les engins créateurs », l'ouvrage pionnier d'Eric Drexler, est disponible en français, gratuitement, sur www.foresight.org/EOC/
- « Pièces et main d'œuvre », un site critique proposant notamment une réflexion sur le développement des nanotechnologies à Grenoble : <http://pmo.erreur404.org/Necrotechnologies.htm>

Plongée au cœur de l'infiniment petit



Macro

Dans le monde macroscopique (notre environnement quotidien), les petites choses se mesurent en millièmes de mètre (10^{-3} m), soit en millimètres (mm). C'est le cas d'une fourmi (3 mm) ou d'un microprocesseur (1 mm).

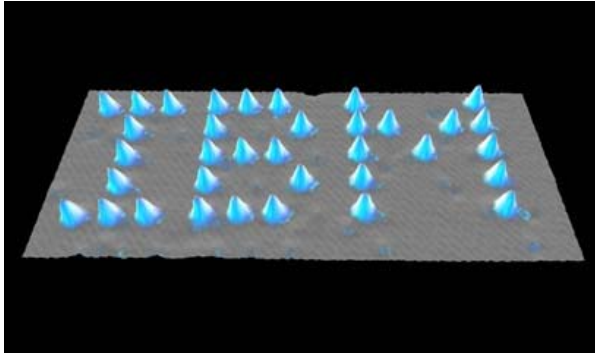
Micro

Mille fois plus petit que le millimètre : le micron (μm) - soit un millionième de mètre (10^{-6} m). C'est l'échelle de tout ce que les microscopes optiques nous permettent d'observer : un acarien (400 μm), un cheveu (75 μm de diamètre), un spermatozoïde (50 μm) ou une bactérie (3 μm).

Nano

Le nanomètre (nm) est mille fois plus petit que le micron. Il correspond au milliardième de mètre (10^{-9} m). Les longueurs d'onde de la lumière visible s'étalant de 780 nm (rouge) à 400 nm (violet), les objets en-deçà de 400 nm, comme le virus de la grippe (100 nm), un brin d'ADN (2 nm de large) ou un atome d'hydrogène (0,1 nm), sont littéralement invisibles aux microscopes optiques les plus puissants. On peut néanmoins reconstituer leur image grâce aux microscopes électroniques, à « effet tunnel » ou à force atomique.

Trois lettres qui en disent long...

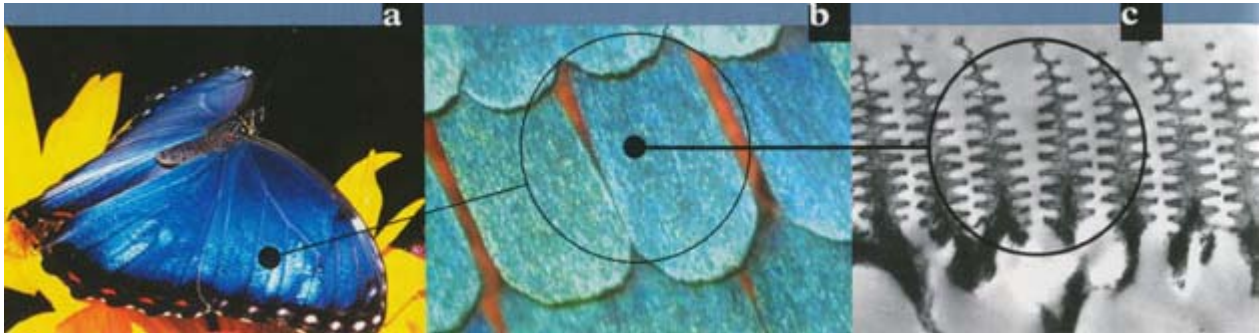


© IBM Almaden

« effet tunnel », mis au point en 1981 par deux chercheurs de chez... IBM, à Zurich (il reçurent en 1986 le Nobel de physique pour cette invention). Si ce microscope permet d'observer les atomes, surtout - et c'est ce que démontre pour la première fois cette image - il permet de les déplacer un à un. La porte des nanotechnologies venait de s'ouvrir...

Ceci n'est pas une pub. Mais ça y ressemble beaucoup... Publiée en 1990 dans la prestigieuse revue « Nature », cette image scientifique a fait le tour du monde. Ses auteurs ont littéralement écrit les trois premières lettres de l'histoire des nanotechnologies - soit le nom de la société qui les emploie - en disposant minutieusement 35 atomes de xénon sur une surface de nickel. Une prouesse rendue possible grâce au microscope à

Une vraie révolution scientifique



Droits : D.R. / P.Vukusic 1999

Ce ne sont pas des pigments qui colorent les ailes bleues du *Morpho rethenor*, ce papillon d'Amérique du Sud (a). Ses écailles (b) sont recouvertes de structures nanoscopiques (c), sortes de minuscules bosses qui décomposent la lumière à la façon d'un prisme. Ces « reflets du nanomonde » ne sont qu'un exemple des propriétés de la matière à l'échelle du nanomètre, où règnent les lois étranges de la physique quantique...

Pourquoi les nanotechnologies provoquent-elles tant d'émoi chez les scientifiques ? Fondamentalement pour deux raisons.

Effets quantiques

La première, c'est l'exploitation d'un univers encore vierge : en-deçà de 50 nanomètres, on pénètre dans le nanomonde où la physique quantique fixe les règles du jeu (la mécanique classique, elle, gouverne le macro et le micro-monde). Ainsi, les objets - atomes, électrons, photons, etc. - ne sont ni des ondes ni des particules, mais quelque chose d'indéterminé entre les deux ! A cette échelle, les propriétés électriques, biologiques, mécaniques, thermiques, magnétiques ou optiques des matériaux peuvent être très différentes de celles observées à l'échelle macroscopique. C'est ce qu'on appelle « l'effet de taille quantique ». Des exemples ? Un lingot d'or est jaune, mais les nanoparticules d'or sont rouges. Un excellent conducteur d'électricité peut devenir un parfait isolant à l'échelle « nano ». Certains composés chimiques sont 100 fois plus réactifs en particules de 10 nanomètres de diamètre que sous forme de molécules d'un micron de diamètre. On peut donc en utiliser 100 fois moins...

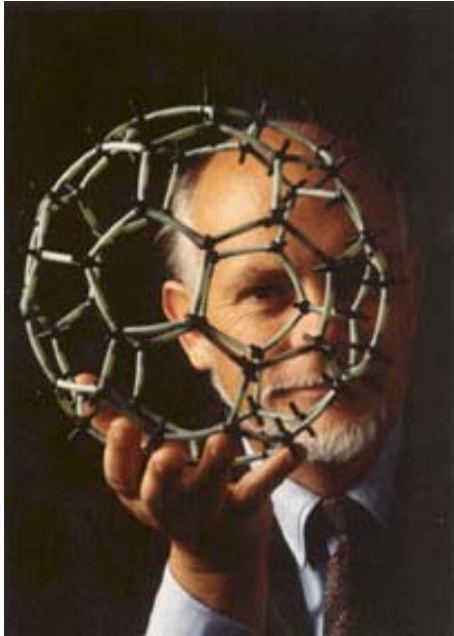
Copier la Nature

Deuxième cause de l'enthousiasme suscité par les nanotechnologies : le changement radical d'approche qu'elles impliquent. Classiquement, la démarche de l'ingénieur consiste à partir de ce qui est grand pour affiner, réduire et aboutir à quelque chose de plus petit. C'est l'approche « top down » qui, grâce à la miniaturisation des composants électroniques, a permis notamment les spectaculaires avancées de l'informatique ces vingt dernières années. Mais cette démarche, qui atteint progressivement ses limites - notamment pour la miniaturisation des circuits électroniques -, se révèle dans de nombreux cas, lourde, coûteuse et génératrice de déchets. La Nature, elle, procède à l'inverse : elle part du petit pour aboutir au grand - pensez à la complexité

d'un nouveau-né, issu de la fusion de deux simples cellules... C'est l'approche « bottom up », bien plus économique en termes de moyens et de déchets générés. Copier la Nature en tâchant de comprendre et d'exploiter l'auto-organisation de la matière fait aujourd'hui fantasmer de nombreux chercheurs. N'est-ce pas elle, finalement, qui a inventé la nanomachinerie complexe qui, dans chacune de nos cellules, assemble les protéines à partir d'instructions encodées dans nos gènes ? Et le nano-moteur à base de protéines qui permet d'actionner le flagelle faisant avancer les spermatozoïdes ? Et les extraordinaires nano-capteurs de lumière présents dans les plantes, sans lesquels la photosynthèse serait impossible ?

Nanotubes et buckyballs

Petits mais costauds !



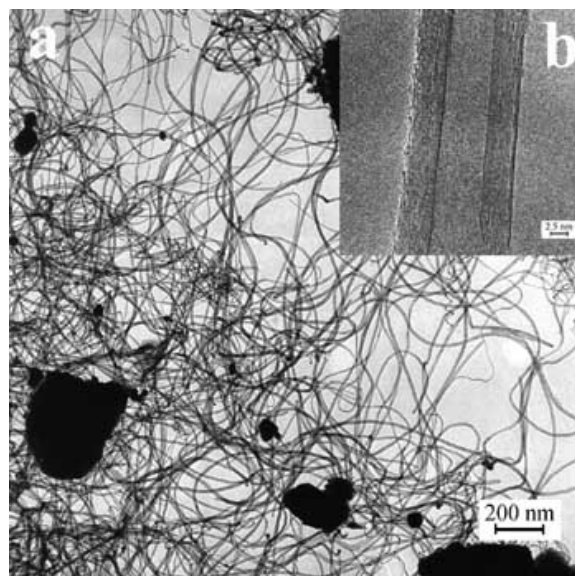
Richard Smalley, co-découvreur des buckyballs, tient fièrement dans sa main une représentation de la structure atomique de la découverte qui lui valut le prix Nobel de chimie en 1996. © UCLA

Composées de 60 atomes de carbone, les « buckyballs » ou buckminsterfullerènes sont des molécules sphériques dont la structure ressemble à celle d'un ballon de football. Découvertes en 1985, elles sont la troisième forme connue de carbone pur - les deux autres étant le graphite et le diamant. Les buckyballs n'ont encore aucune application concrète aujourd'hui. Mais c'est dans le secteur médical qu'elles devraient se révéler les plus fécondes. La société C Sixty, par exemple, « greffe » d'autres molécules sur des buckyballs pour leur permettre peut-être un jour d'inhiber le virus du SIDA ou de cibler les cellules cancéreuses.

Mais les véritables stars du nanomonde sont sans conteste les nanotubes de carbone. Découverts accidentellement en 1991 par le Japonais Sumio Iijima, en essayant de produire des buckyballs, les nanotubes sont des cylindres creux dont les parois sont constituées uniquement d'atomes de carbone. Les plus fins ont un diamètre d'un nanomètre. Cent fois plus solides que l'acier – mais six fois plus légers ! -, élastiques et meilleurs conducteurs d'électricité que le cuivre, les nanotubes ont des applications potentielles énormes. Certaines raquettes de tennis Babolat en contiennent, ce qui les rend plus solides sans augmenter leur poids. Samsung, Motorola et Sony travaillent sur des prototypes d'écrans ultra-plats à base de nanotubes. Ils pourraient également remplacer, à terme, le silicium comme brique de base de la microélectronique. « On peut aussi utiliser les nanotubes pour stocker de l'hydrogène, le carburant des piles à combustible », explique Janos B. Nagy, chimiste aux facultés universitaires de Namur (Belgique) et père de la spin-off Nanocyl, qui produit et commercialise des... nanotubes. « Ces molécules sont parfaitement biocompatibles : elles sont donc idéales pour réaliser des prothèses, par exemple. Elles sont en outre capables de convertir un mouvement

Mais les véritables stars du nanomonde sont sans conteste les nanotubes de carbone. Découverts accidentellement en 1991 par le Japonais Sumio Iijima, en essayant de produire des buckyballs, les nanotubes sont des cylindres creux dont les parois sont constituées uniquement d'atomes de carbone. Les plus fins ont un diamètre d'un nanomètre. Cent fois plus solides que l'acier – mais six fois plus légers ! -, élastiques et meilleurs conducteurs d'électricité que le cuivre, les nanotubes ont des applications potentielles énormes. Certaines raquettes de tennis Babolat en contiennent, ce qui les rend plus solides sans augmenter leur poids. Samsung, Motorola et Sony travaillent sur des prototypes d'écrans ultra-plats à base de nanotubes. Ils pourraient également remplacer, à terme, le silicium comme brique de base de la microélectronique. « On peut aussi utiliser les nanotubes pour stocker de l'hydrogène, le carburant des piles à combustible », explique Janos B. Nagy, chimiste aux facultés universitaires de Namur (Belgique) et père de la spin-off Nanocyl, qui produit et commercialise des... nanotubes. « Ces molécules sont parfaitement biocompatibles : elles sont donc idéales pour réaliser des prothèses, par exemple. Elles sont en outre capables de convertir un mouvement

solides que l'acier – mais six fois plus légers ! -, élastiques et meilleurs conducteurs d'électricité que le cuivre, les nanotubes ont des applications potentielles énormes. Certaines raquettes de tennis Babolat en contiennent, ce qui les rend plus solides sans augmenter leur poids. Samsung, Motorola et Sony travaillent sur des prototypes d'écrans ultra-plats à base de nanotubes. Ils pourraient également remplacer, à terme, le silicium comme brique de base de la microélectronique. « On peut aussi utiliser les nanotubes pour stocker de l'hydrogène, le carburant des piles à combustible », explique Janos B. Nagy, chimiste aux facultés universitaires de Namur (Belgique) et père de la spin-off Nanocyl, qui produit et commercialise des... nanotubes. « Ces molécules sont parfaitement biocompatibles : elles sont donc idéales pour réaliser des prothèses, par exemple. Elles sont en outre capables de convertir un mouvement

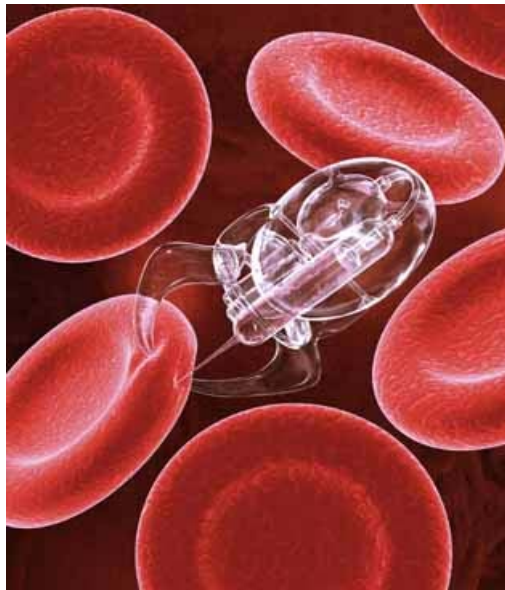


Non, ce ne sont pas de vieux spaghetti au fond d'une casserole ! Il s'agit de nanotubes vus au microscope électronique à transmission (a). Les parties noires représentent le catalyseur sur lequel ces nanotubes multi-parois ont « poussé ». Et comme le montre le gros plan (b), ils sont bien creux.

© Dr J-F Colomer (FUNDP)

mécanique en électricité. On peut donc imaginer des drapeaux à base de nanotubes qui produisent de l'électricité simplement en flottant dans le vent. » Et la liste est encore longue. Seul problème, le prix des nanotubes : environ 750 euros le gramme pour les mono-paroi, soit 70 fois le prix de l'or. « Mais ça va baisser », assure Janos B.Nagy. « Comme nos concurrents, nous sommes occupés à créer le marché ». Un marché estimé à 430 millions de dollars en 2004...

Les promesses de la nanomédecine



© www.coneyljay.com

Cette image symbolise un des nombreux espoirs fondés dans la nanomédecine : la mise au point de machines microscopiques composées d'éléments nanométriques évoluant dans le corps humain pour y effectuer des prélèvements ou délivrer des molécules médicamenteuses « juste là où il faut ». Ici, un microrobot introduit sa microseringue dans un globule rouge. Pure science-fiction ? Pas pour le chercheur Robert Freitas, auteur d'un imposant ouvrage en quatre tomes sobrement intitulé « Nanomedicine », et dont le deuxième volume vient de sortir de presse (1). En 1996 déjà, Freitas publiait le premier article scientifique de l'histoire nanomédicale. Il y décrivait le fonctionnement du « respirocyte », un globule rouge artificiel d'un micron de diamètre capable de transporter 236 fois plus d'oxygène que nos globules rouges naturels.

Selon Freitas, le médecin du futur sera capable d'activer et de désactiver les respirocytes via des infrasons envoyés à travers le corps du patient. D'après ses calculs théoriques, si l'on injectait un litre de respirocytes dans le système sanguin d'un individu sain, celui pourrait rester quatre heures assis calmement au fond d'une piscine avant de reprendre son souffle ! Voilà qui devrait intéresser sportifs et militaires...

Mais les premières applications de la nanomédecine seront sans doute moins ambitieuses et plus réalistes. Plusieurs équipes travaillent à la mise au point de « traceurs » à base de nanoparticules, en vue d'améliorer les techniques d'imagerie médicale actuelles. Par ailleurs, des nanomatériaux biocompatibles devraient révolutionner sous peu le secteur des prothèses médicales. Enfin, des laboratoires de poche (« labs-on-a-chip »), actuellement au stade de prototypes, permettront bientôt de réaliser des tests sanguins ou génétiques en un temps record. Très utile pour le diagnostic médical. Mais également pour la sélection des clients par les assureurs, par exemple...

(1) Robert A. Freitas Jr., « Nanomedicine, Volume IIA : Biocompatibility », Landes Bioscience, 2003 ; www.nanomedicine.com

André Gsponer, expert indépendant

« La nanotechnologie va permettre l'avènement d'armes nucléaires de 4^{ème} génération »

André Gsponer est physicien nucléaire des hautes énergies. Ancien chercheur au CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) à Genève, cet expert en armes atomiques dirige aujourd'hui l'ISRI (Independent Scientific Research Institute), basé également dans la cité helvétique. Interview.



© D. Winteregg

La nanotechnologie permet de manipuler la matière atome par atome. Quel rapport entretient-elle avec l'industrie nucléaire ?

Historiquement, la nanotechnologie est un enfant du nucléaire, une création du complexe militaro-industriel. Elle est née il y a une trentaine d'années dans les laboratoires travaillant à la conception d'armes nucléaires, sous les étiquettes d'« ingénierie micromécanique » et de « microsystèmes électromécaniques » (MEMS). Aujourd'hui, les nanotechnologies sont vendues au grand public et aux décideurs politiques comme relevant d'une entreprise scientifique. Mais leurs applications les plus significatives, à court terme, seront militaires.

Quelles seront ces applications ?

Prouesse de la miniaturisation, ce pignon a un diamètre plus petit que l'épaisseur de cinq cheveux. C'est ce genre de mécanisme qui permettra de sophistication les armes nucléaires.

© Sandia
(Lockheed Martin)



Dans un premier temps, les nanotechnologies vont permettre d'améliorer les armes actuelles. De nouveaux micromécanismes extrêmement robustes et fiables vont permettre de déclencher les explosions atomiques au moment voulu, après que les bombes aient pénétré profondément dans le sol ou le béton, par exemple. L'uranium appauvri, utilisé

lors de la première guerre du Golfe, au Kosovo et récemment en Irak, sera prochainement remplacé par des nano-alliages à base de tungstène qui permettront de percer les blindages encore mieux que l'uranium. Ces nouveaux alliages seront certainement la première application importante de la nanotechnologie dans l'industrie métallurgique.

Remplacer l'uranium appauvri par des nanomatériaux est plutôt une bonne chose pour l'environnement...

A priori oui. Mais l'usage d'armes à uranium appauvri en 1991, en Irak, a de toute façon brisé un vieux tabou de 46 ans : celui de l'utilisation de matériaux faiblement radio-actifs lors des combats. Cela tend à banaliser l'usage d'armes faiblement radio-actives et ouvre donc la voie aux armes nucléaires de 4^{ème} génération, actuellement en gestation dans les laboratoires nucléaires.

C'est-à-dire ?

Contrairement à la bombe atomique, à la bombe à hydrogène et à la bombe à neutron, les armes nucléaires de 4^{ème} génération sont des nouveaux types d'explosifs nucléaires que l'on peut développer sans enfreindre le Traité d'interdiction des essais nucléaires (CTBT). On peut en effet simuler les essais dans des installations dites « de confinement inertiel », comme le National Ignition Facility de Livermore, aux Etats-Unis, ou le Laser Mégajoule français, à Bordeaux. Actuellement, on utilise des méthodes « artisanales » pour fabriquer les minuscules dispositifs qui contiennent le carburant thermonucléaire - les micro-mécanismes sans doute les plus sophistiqués qui existent aujourd'hui. L'industrialisation de ce genre de techniques, grâce à la nanotechnologie, permettra de fabriquer ces petites bombes à micro-fusion en grand nombre. On les retrouvera, d'ici 10 à 20 ans, dans les armes nucléaires de 4^{ème} génération : petites, légères et extrêmement puissantes, celles-ci produiront très peu de retombées radio-actives puisqu'elles exploitent la fusion plutôt que la fission atomique.