

LES NANOTECHNOLOGIES : DÉFIS & ENJEUX DU 21^{ème} SIÈCLE

Professeur Abderrahmane KADRI

Laboratoire d'Étude des Matériaux Optoélectronique & Polymères : **L . E . M . O . P .**

Web site : www.lemop-uo.net; Tél. fax : 213(0) 41 514080 ; e-mail : kadri.lemop.uo@mail.com

Département de Physique, Faculté des Sciences,
Université d'Oran (Es-Sénia), 31100, Oran, Algérie

Résumé : Les Nanotechnologies représentent l'activité humaine qui a connu le développement le plus fulgurant, le plus global et le plus spectaculaire de toute l'histoire de l'humanité. Connues, il y a à peine une décennie, de seulement quelques spécialistes, confinées à quelques laboratoires scientifiques de très haut niveau, elles sont devenues aujourd'hui un enjeu majeur de recherche & développement, jamais posé avec une telle acuité à l'ensemble des acteurs de la société, toutes disciplines confondues: scientifiques, chercheurs, industriels, stratèges et décideurs politiques. Au-delà des défis scientifiques et technologiques, les nanotechnologies posent des enjeux inédits, à la fois stratégiques et économiques. En effet, il est attendu que l'ensemble des activités industrielles et économiques intégreront progressivement en leur sein ces nanotechnologies pour basculer totalement à terme. Ces nouvelles technologies sont prévues de constituer un marché en augmentation constante de 1000 Milliards de \$US en 2010 à environ 3000 Milliards de \$US vers 2015 et beaucoup plus vers l'horizon 2020. Bien plus qu'un simple défi de miniaturisation, les nanotechnologies constituent une véritable révolution scientifique, technologique, industrielle et économique. Elles ouvrent une nouvelle ère pleine d'espairs en ce 21^{ème} siècle, mais aussi pleine de craintes justifiées ou non.

Abstract : The Nanotechnologies are the emerging field of activities which have shown the fastest speed, the more global and the more spectacular growth rates in human being history. Almost a decade ago, the nanotechnologies were the curiosity of only few specialists confined to even fewer high tech Laboratories. Now, they put fundamental challenges in Research & Development, with an unknown before acuity, facing all the actors of the society, whatever their role: scientists, researchers, industry managers, as well as strategy and policy makers. In addition to scientific and technology issues, the nanotechnologies constitute by themselves some unprecedented strategic and economic challenges. For, it is strongly believed that overall industry and economy will integrate gradually the nanotechnologies until a complete switch. The world market for nanotechnology products will show a continuous rise from about \$1,000 billion in 2010 to over \$3,000 billion in 2015 and much more in 2020. More than simply a miniaturization challenge, the nanotechnologies offer the possibility for another new and rather sharp revolution in sciences, technology, industry, and economy, opening a new era in this 21st Century, full of expectations but also of right and wrong fears too.

I. Introduction :

L'aventure des Nanotechnologies tient son origine dans la célèbre conférence présentée par le Professeur Richard P. Feynman (prix Nobel de Physique 1965) au Congrès annuel 1959 de l'*American Physical Society* et intitulée "*There is plenty of room at the bottom*", où il a posé la question: "*Pourquoi ne pourrions-nous pas écrire l'intégralité des 24 volumes de*

l'encyclopédie Britannica sur la tête d'une épingle ?" et a répondu: "*Les principes de la physique, pour autant que nous puissions en juger, ne s'opposent pas à la possibilité de manipuler des choses atome par atome*".

Le terme de "Nanotechnologie" a été inventé et utilisé pour la première fois en 1969, par Eric Drexler, alors étudiant du Professeur Richard P. Feynman, pour les besoins de son rapport de stage.



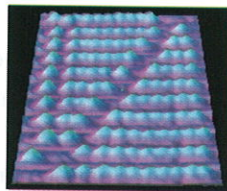
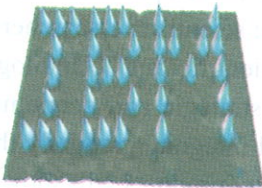
Richard P. Feynman
California Institute of Technology

Cependant, l'ère des nanotechnologies n'a débuté que vers la fin des années 1990, en plusieurs étapes :

- 1981 : invention du Microscope électronique à effet tunnel (STM) & Microscope à force atomique (AFM) par G.Binnig&H.Röhrer au Laboratoire IBM à Zurich .
- 1986 : le prix Nobel de Physique leur fût décerné.

Le STM a d'abord permis d'observer les atomes et les molécules à l'unité, puis de les déplacer à l'unité :

- 1990 : D. Eigler réalise le tour de force de dessiner le sigle IBM avec des atomes de Xe sur une surface de Ni
- 1996 : IBM est capable de déplacer des objets nano-scopiques en plus de la matière: "bouclier atomique".



La prophétie du Professeur R.P. Feynman, formulée 40 ans plus tôt, était en passe de se réaliser ! Mieux :

- 1998: le Centre IBM à Zürich réalise le 1^{er} rotor moléculaire: cette molécule capable de tourner autour de son axe sera le prémisses du *moteur nanoscopique* ;
- 1999: à l'Université de Bâle, Suisse, des chercheurs découvrent la conductivité électrique de l'ADN qui servira à former les interconnexions électriques de nanocomposants d'un genre nouveau. Leur particularité inédite est d'associer dans la même structure des

matières très différentes : minérales, organiques et biologiques! : *Les nanotechnologies sont nées !*

Très vite, des Centres de Recherche spécifiquement dédiés aux Nanotechnologies verront le jour : vers 2001 aux USA et au Japon, puis vers 2003 en Europe et actuellement dans différents pays émergents.

Ainsi, les Nanotechnologies désignent l'ensemble des *disciplines scientifiques et technologiques* où il s'agit de *concevoir*, de *fabriquer* et d'*utiliser des objets* de la taille du "*Nanomètre*" (un milliardième de mètre soit 10^{-9} mètre). Ainsi définies, les Nanotechnologies pourraient apparaître comme les disciplines chargées d'une *Miniaturisation des objets à l'extrême*, de la taille de *quelques atomes* seulement.

Cependant, très rapidement, il s'est avéré que le concept de Nanotechnologie va en réalité, au-delà d'une simple étape de miniaturisation somme toute "naturelle" : le "*Nanomètre*" avec ses difficultés prévisibles par rapport à l'étape précédente, celle du "*Micromètre*" (un millionième de mètre ou 10^{-6} mètre) qui a été inaugurée, il y a environ plus d'un demi-siècle auparavant, dans les années 1950 et qui est à la base de nos outils quotidiens: la microélectronique, le micro-ordinateur, l'informatique, l'internet, les communications numériques satellitaires, la téléphonie mobile, le microscope électronique, l'imagerie médicale,

...
De même, les Nanotechnologies font apparaître plus qu'une simple pluridisciplinarité ou interdisciplinarité somme toute classique qui ferait "coopérer" des disciplines différentes: la Physique, la Chimie, la Biologie, la Médecine et les Technologies associées, tout en permettant à chacune d'elles de garder son identité, son approche, ses concepts, sa méthode, ...

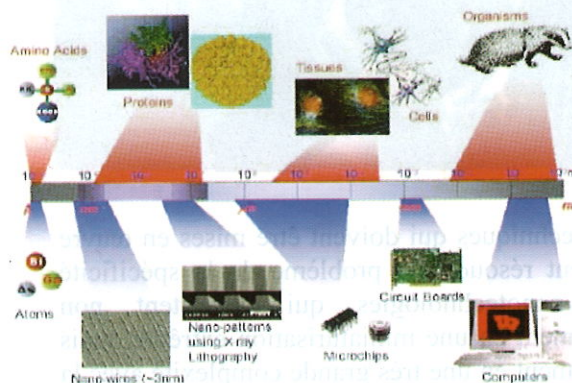
Les Nanotechnologies font en réalité appel à une pan-disciplinarité qui va au-delà de cette simple conjugaison des efforts. Les Nanotechnologies se trouvent en fait à la confluence de l'ensemble de ces disciplines scientifiques, à la fois, à leur pointe la plus avancée, à leurs difficultés les plus extrêmes et au point de leur inflexion, voire de leur remise en question toutes disciplines confondues.

Tout se passe comme si une frontière fondamentale est atteinte et pourtant le *Nanomètre* contient encore 10 *Angström*, soit typiquement 10 fois la taille d'un atome. Ce qui constitue, après tout, des distances qui ne sont

pas si extraordinaires pour les scientifiques. En effet, au quotidien, la Physique Atomique, la Physique Nucléaire, la Physique des Particules et des Hautes Energies savent traiter des dimensions encore plus petites que l'Angström, le Femtomètre ou le Fermi, soit 10^{-15} mètre, qui est typiquement de la taille d'un proton, l'Attomètre, soit 10^{-18} mètre, qui est typiquement la longueur d'onde associée à une particule élémentaire de très haute énergie sortant d'un accélérateur moderne. Sans oublier la distance fétiche des Physiciens Théoriciens, la plus petite distance connue de la physique: la longueur de Planck, soit 10 fois un milliardième du milliardième du milliardième de mètre, ou encore 10^{-35} mètre !!!
Où est donc la question ?

II. Voie "descendante" ou "ascendante" ?

Dans cette fameuse conférence de 1959, bien avant l'avènement de la microélectronique et 40 ans avant l'apparition des nanotechnologies, le Professeur R.P. Feynman formule simplement une vision de génie : *"Plutôt que de diviser sans cesse la matière, pourquoi ne pas partir de l'infiniment petit pour construire quelque chose?"* Traduite à notre époque, cette formule aurait pu être : *"plutôt que d'emprunter la voie habituelle descendante (top-down) de la miniaturisation artificielle due à la microélectronique et qui connaît maintenant de sérieuses limites fondamentales et technologiques, pourquoi ne pas emprunter la voie ascendante (bottom-up) qui consisterait à utiliser les atomes et les molécules pour les 'auto-assembler' et les 'auto-fonctionnaliser', à l'image même des processus que la nature sait produire spontanément et faire construire ainsi des nanoobjets/nanomachines autrement plus performantes que tout ce qui a été connu jusqu'à maintenant ?"*

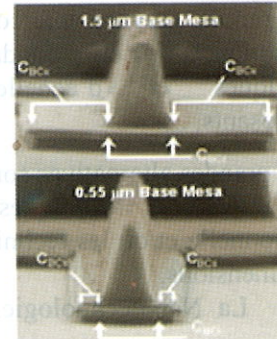


A l'interface des nanosciences et la biologie

source : MRSEC -University of Wisconsin - Madison

I. La voie "descendante" de la microélectronique :

L'ère de la microélectronique a commencé en 1958 et tient son origine dans deux inventions et quelques idées majeures : - Celle du transistor, en 1947, à Bell



Laboratories (USA) par Bardeen, Brittain et Shockley (Prix Nobel de Physique 1956), – celle des circuits intégrés au Silicium en 1958 par Kilby (Prix Nobel de Physique 2000) et Noice, ainsi que quelques idées moins spectaculaires, mais décisives : la technologie Planar (plan par plan), le Microprocesseur, la technologie MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) et les règles de conception d'une interface invariante de technologie (VLSI : Very Large Scale Integration).

Dès 1958, la microélectronique va emprunter la voie de la miniaturisation artificielle, voie descendante, qui consiste à aller du macroscopique au microscopique, en réduisant continuellement la taille des composants électroniques et, par là même, leur puissance, l'énergie dissipée et leur coût. Depuis 1958, la dimension des composants a été réduite à un taux annuel de 13% selon la loi de Moore et est passée de $>50\mu\text{m}$ en 1958 à $0.1\mu\text{m}$ en 2000 (à $0.01\mu\text{m}$ vers 2010-2020). Sur la même période, un transistor est passé de 10^{20} Atomes/ 0.1cm^3 à seulement 10^7 Atomes/ $0.01\mu\text{m}^3$. Dans le même temps, l'énergie minimum par bit d'opération est passée de 10^{-9} Joules à 10^{-16} Joules, réduisant les capacités et tensions d'opération des composants.

Cette variation de 12 ordres de grandeurs était la condition de la réussite d'une microélectronique avec un haut niveau d'intégration non limitée par la dissipation de puissance ou de chaleur. Ceci a permis de diviser le coût d'un transistor par un milliard en l'espace de 50 ans. D'où la diffusion très large de cette technologie dans la vie de tous les jours.

Il est cependant admis que la technologie CMOS-Si actuelle est en passe d'atteindre sa limite inéluctable de miniaturisation ultime à 10nm vers 2010-2020. Cette limite est inhérente à la méthode CMOS-VLSI, pour des raisons technologiques (limites intrinsèques de définition et de matérialisation des composants, lithographie, gravure, interconnexions, isolation, dissipation,...) et fondamentales (effets quantiques et d'échelle, stabilité des composants, ..).

Deux grandes alternatives sont possibles:

- Les techniques d'intégration fonctionnelle et/ou les techniques de fabrication à 3 dimensions.
- La Nanotechnologie.

Les premières techniques sont déjà utilisées à l'heure actuelle pour les dimensions $100\text{nm} < d < 200\text{nm}$:

- certaines couplent la lithographie optique UV avec l'immersion dans des solutions permettant de réduire la longueur d'onde effective ;
- d'autres impliquent le microprinting, l'auto-assemblage, le templating et utilisent des fluides supercritiques pour vaincre les tensions de surface.

Cependant, ces techniques nécessitent des efforts colossaux pour relever les défis d'imaginer de nouvelles approches de gravure, de dépôt et de etching et ne produiront des composants de série de 45nm que vers 2010 et de 32nm vers 2013. La difficulté majeure persistera pour des dimensions $\leq 10\text{nm}$.

Les techniques de fabrication 3D : la lithographie à 2 photons à Laser femtoseconde (TPA : two-photon absorption photopolymérisation process) sont prometteuses pour la fabrication de structures à topographie complexe avec une très grande résolution. Cependant, ces techniques sont confinées actuellement à des dimensions de composants typiquement $> 1\mu\text{m}$ et souffrent d'insuffisances :

- la nature séquentielle du photo-process et
- des matériaux qu'elles sont capables d'adresser, i.e. les photo-résines qui réduisent leur champ des applications.

Il apparaît ainsi clairement que pour $d < 10\text{nm}$:

- il est impossible de continuer à construire un transistor sur les concepts actuels de la technologie CMOS et VLSI, même réadaptés,

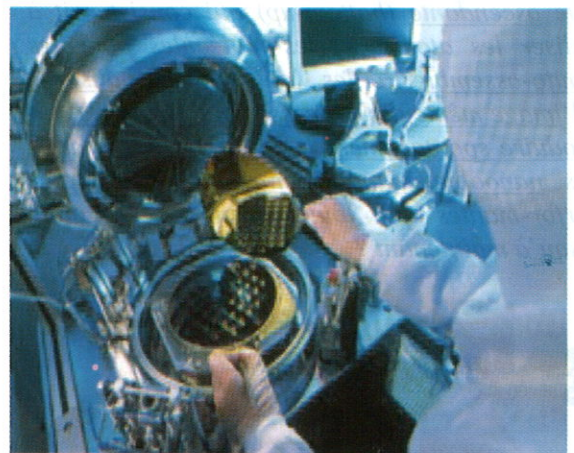
la technologie CMOS deviendra économiquement non viable, car hors de prix, violant son principe de rentabilité de base: plus petit = moins cher. Elle sera battue par la nanotechnologie, plus rentable.

Des solutions provisoires essayent de combiner les deux approches à la fois "descendante" et "ascendante" et ce, afin d'assurer une compatibilité au moins transitoire avec les techniques de fabrication industrielle existantes, en attendant de trouver les techniques "ascendantes" adéquates et de revoir fondamentalement l'ensemble des process.

2. la voie "ascendante" de la nanotechnologie :

Pour que les nanotechnologies parviennent à fabriquer des composants de tailles réduites à l'extrême, bien au-dessous de la limite actuelle de la microélectronique, elles doivent abandonner les concepts mêmes sur lesquels a été basée la technologie VLSI-CMOS. Elles doivent résoudre 03 questions fondamentales :

- concevoir les process technologiques et les matériaux qui permettent une réduction à cette échelle en empruntant la voie ascendante,
- mettre en place les nouveaux concepts fondamentaux des sciences des composants à cette échelle nanométrique: les nanosciences, dont la nanophysique qui est radicalement différente de la physique actuelle des composants électroniques ;
- réaliser les conditions d'une viabilité économique permettant leur développement.



Les techniques qui doivent être mises en œuvre doivent résoudre le problème de la spécificité des nanotechnologies qui consistent non seulement en une miniaturisation extrême, mais également en une très grande complexité avec la difficulté majeure de faire cohabiter dans une

même structure des matériaux très différents : minéraux, organiques et biologiques.

De nombreuses voies technologiques sont actuellement explorées. Elles visent à développer des process qui permettent d'obtenir un auto-assemblage et une auto-fonctionnalisation ascendante d'objets nanométriques en empruntant des procédés inspirés de la biologie couplés avec les techniques de pointe de la physico-chimie des nanomatériaux, : il s'agit de techniques de nano-patterning et nano-imprint par lithographie UV, de lithographie de block-copolymères, et de techniques de fabrication utilisant des fluides super-critiques.

III. Les Nano-objets des Nanotechnologies :

Les Nano-objets des nanotechnologies peuvent être :

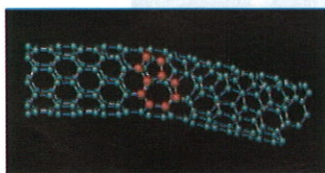
- Les nanomatériaux qui sont formés par une ou plusieurs molécules, ou chaîne macromoléculaire, de taille allant d'un à plusieurs dizaines de nanomètres. Ces nanomatériaux sont destinés à former les briques de bases pour les nanotechnologies plus complexes ;

- Les nanocomposants sont des entités plus complexes, formées par un ou plusieurs nano-matériaux auto-assemblés en vue de remplir une fonction précise. Ces nanocomposants sont les unités de base des nanotechnologies.

Les molécules et structures qui entrent dans la composition de ces nano-objets peuvent être de diverses origines : -minérale, -organique, -biologique. Les nanotechnologies ont la particularité d'associer tous ces matériaux à la fois dans un même composant très complexe.

1. Exemples de nanomatériaux :

a. les nanotubes de carbone :



Wikipedia, Novembre 2005

Feuille de Carbone-hexagonal enroulée sur elle-même pour former un nanotube de Carbone de $\varnothing=1$ à 10nm, 6 fois plus légers et 100 fois plus solides que l'acier, ils possèdent des propriétés

totalement nouvelles par rapport aux fibres de carbone classiques.

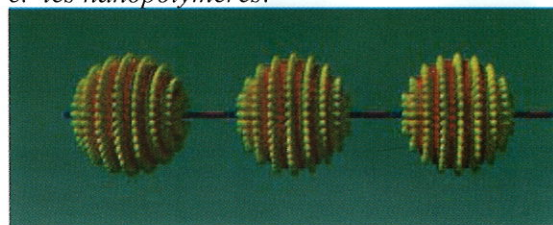
b. Boites Quantiques Lasers :



SPIE Website, News, Feb.2007

Des Boites Quantiques nanométriques forment une matrice de spots Laser beaucoup plus performantes que les structures conventionnelles.

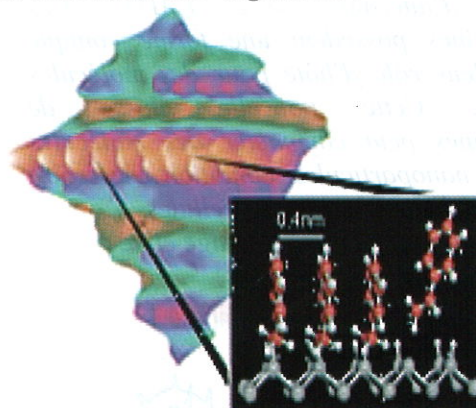
c. les nanopolymères:



MRS Website, Materials news, Feb.2007

Les premiers polymères nanométriques : Introduction de défauts sur les faces opposées des surfaces sphériques des nanoparticules métalliques, puis les particules divalentes qui en résultent sont ensuite chaînées ensemble pour former un freestanding film.

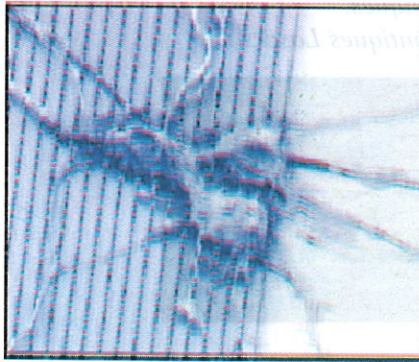
d. Molécules auto-organisées :



Centre National de la Recherche au Canada, Mai 2005

Des molécules organiques s'auto-assemblent et amorcent une réaction en chaîne pour former un fil.

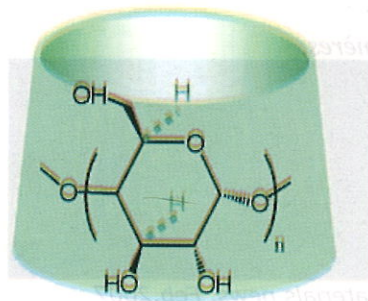
e. Nano-interface minérale-biologique :



Interface neurones-silicium
source : Cornell

MRS Website, Materials news, Feb.2007

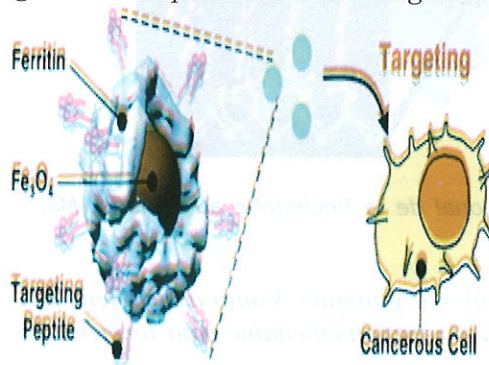
f. Nano-molécule d'ADN :



MRS Website, Materials news, Feb.2007

Bouquet moléculaire compacteur d'ADN en nano-particules, ayant des applications potentielles en thérapie génétique. Des chercheurs ont pu élaborer une série de colonnes cycliques appelées Cyclodextrines capables d'interagir avec l'ADN. Ces Cyclodextrines possèdent une forme conique facilitant leur rôle d'hôte pour des molécules étrangères. Cette nouvelle classe de cyclodextrines peut compacter des molécules d'ADN en nanoparticules, condition nécessaire au transfert de l'ADN dans les cellules.

g. Nanoparticule à adressage ciblé :

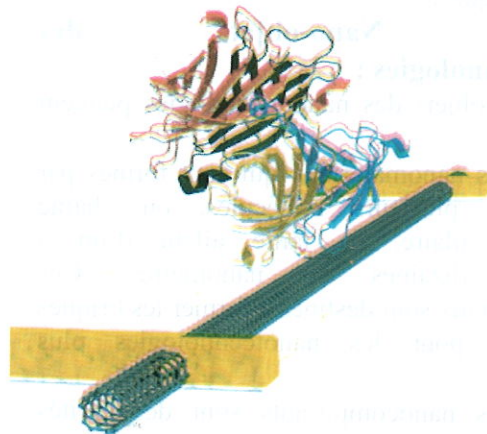


MRS Website, Materials news, Feb.2007

Les nanoparticules ont des applications médicales potentielles. Mais ceci dépend de leur ciblage exact. Une étude récente a montré que de telles particules peuvent être créées à l'intérieur d'un moule protéique qui peut non seulement configurer exactement leur taille, mais également les programmer à une cible déterminée, soit un type précis de cellules. Ces nanoparticules à base d'oxyde de Fer self-assemblées spontanément dans une protéine, pourraient être utilisées en imagerie et en traitement des cancers.

2. Exemples de nano-composants :

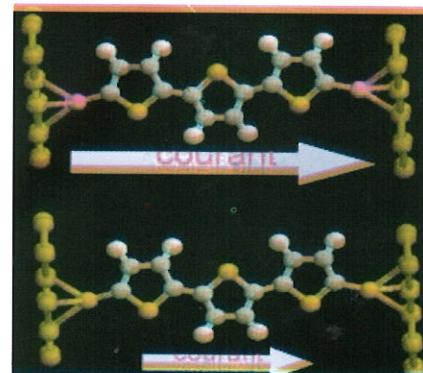
a. Nano-objet complexe :



MRS Website, Materials news, Feb.2007

Une molécule peut être attachée individuellement par covalence à un nanotube de carbone en utilisant une nouvelle méthode électrochimique. Cette technique fournit une voie de fonctionnalisation contrôlée des parois du nanotube, doublée d'une capacité de test des réactions chimiques in-situ.

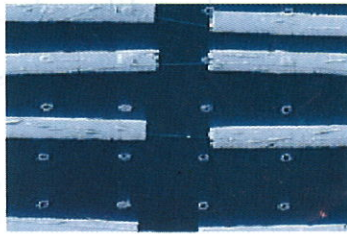
b. Nano-transistor à une molécule :



Hewlett-Packard arrive à nicher un transistor dans une molécule. Selon la configuration de la molécule, elle laisse passer ou non le courant, à l'image d'une diode amplificatrice, ou

transistor. La molécule peut être attachée, greffée sur deux brins de nanotubes de carbone.

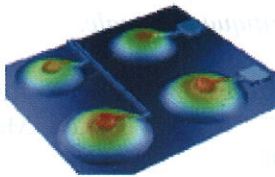
c. détecteur de molécules biologiques:



Détecteur de molécules biologiques
source : Harvard

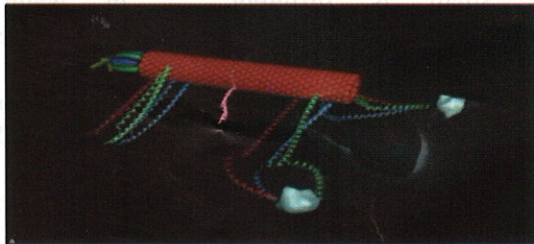
Nano-bio-détecteur fonctionnalisant des entités biologiques sur substrat minéral.

d. Bio-capteur :



Nano-résonateurs piézoélectriques utilisés pour la détection d'interactions bio-spécifiques.

e. bio-nanorobot :



Un bio-nanorobot tel qu'il pourrait être conçu. Corps en nanotubes, membres en peptides, tête dotée d'un moteur moléculaire, un tel nanorobot pourrait se propulser à l'intérieur de l'organisme humain pour diverses applications.

IV. Applications des nanotechnologies :

Les nanotechnologies sont utilisées ou en voie de l'être dans des domaines extrêmement variés couvrant l'ensemble des secteurs sensibles de la société : cela va des recherches scientifiques de pointe encore en laboratoire aux applications spatiales et militaires, en passant par les applications médicales. Il est difficile d'être exhaustif, mais on peut citer principalement :

1. Applications dans les technologies de pointe :

Ce sont les applications dans les nouvelles technologies de pointe à la base même

des nanotechnologies, telles que : la Nano-électronique, la Nano-opto-électronique, Les ordinateurs quantiques ultra-puissants (à base de photons intriqués), les Nouvelles Technologies de l'Information & Communications, l'Informatique, la Robotique, l'Intelligence Artificielle, la Téléphonie Mobile, l'Internet & l'Intranet,...

2. Applications Médicales & Pharmaceutiques :

Les nanotechnologies présentent des potentialités énormes dans les applications médicales du futur : la nanomédecine, avec de nouvelles techniques ultraciblées et performantes de nano-diagnostic, de nano-détection, nano-imagerie, nano-thérapie, nano-chirurgie, et de médicaments intelligents à doses infinitésimales et interactifs in-vivo.

3. Applications Industrielles & Agro-alimentaires :

Nouveaux procédés de fabrication de matériaux où des nanomatériaux sont intégrés : dilués, précipités, mixés, ou enduits en revêtement ; de tels matériaux présentent des propriétés totalement nouvelles : mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques,...

Ces propriétés présentent un énorme intérêt dans tous les secteurs de l'Industrie et, en particulier : les secteurs de l'Aéronautique, du Naval, de l'Aérospatiale, de l'Automobile, ...

Par ailleurs d'énormes potentialités se profilent également dans les industries Agro-alimentaires, Hydraulique, ...

4. Nouvelles techniques de Construction, Habitat, Domotique, Transport :

Nouvelles techniques de Construction, d'Habitat, de Domotique ou Maisons/Villes Intelligentes, Murs ré-arrangeables, à transparence et à impression variables, ...

5. Applications Spatiales et Militaires :

Electronique et informatique embarquées, systèmes de navigation et guidage des fusées et des missiles, systèmes de communications à cryptage quantique, combustible solide haute efficacité, longue durée, nouveaux types d'armements, d'explosifs, de combinaisons protectrices, intelligentes et d'assistance au combat,...

Tout ceci peut paraître proche du rêve ou de la science-fiction. Cependant les potentialités, les enjeux stratégiques et économiques sont réels. Il s'agit d'acquérir des capacités de contrôle et une

puissance jamais égalées. Les nanotechnologies sont en passe d'ouvrir une ère totalement nouvelle: l'ère de la nanotechnologie/nano-économie, aussi déterminante pour l'humanité que celles de la découverte du feu, du fer, du bronze, de l'industrie lourde, de l'électronique-informatique. Elle ne sera certainement pas sans conséquences majeures sur la société à la fois très bénéfiques et potentiellement néfastes.

V. Conséquences sur la société et le monde : Comme nous l'avons souligné, les nanotechnologies vont provoquer une révolution majeure et inédite dans l'ensemble des secteurs socio-économiques, à l'échelle mondiale. Ceci se traduira inéluctablement par des conséquences importantes sur l'ensemble de la société. Ces conséquences seront à la fois très positives et potentiellement négatives.

Les implications positives sont sans aucun doute un énorme gain en confort et en qualité de la vie, grâce à un progrès sans précédent de la sécurité des approvisionnements, de l'économie, de l'industrie, de la médecine, des services et des conditions de vie.

Cependant, en plus du confort et de la qualité de la vie, ces nanotechnologies vont induire un changement radical de mode de vie qui peut déboucher vers des comportements individualistes, dé-socialisés, voire des dérives sociales.

Plus grave, des questions d'éthique, d'environnement, de sécurité et de sûreté de fabrication et d'utilisation des nanotechnologies se posent déjà avec acuité. Ces interrogations et peurs légitimes du Public sont très sérieuses et ne sont pas le credo uniquement d'écologistes rêveurs, utopistes, ou d'associations de lutte pour l'environnement orthodoxes.

Un récent Rapport des Nations Unis (Nairobi, Kenya, 06/02/2007), émanant de United Nations Environment Program demande aux états membres la mise en œuvre d'actions appropriées pour évaluer ces nouvelles techniques et en assurer un usage sécurisé et conforme.

Ceci ne veut pas dire qu'on doit verser dans le catastrophisme, mais plutôt dans une gestion rationnelle, intelligente et équilibrée, pour en tirer le maximum de profit avec le minimum de risques. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des codes de sécurité, de sûreté, de déontologie et d'éthique.

VI. Conclusions : L'Ere fascinante des Nanotechnologies ouvre toutes grandes les portes d'une nouvelle aventure humaine en ce début du

21^{ème} Siècle: Il s'agit de contrôler avec une précision jamais encore égalée des processus de fabrication de matériaux connus ou à découvrir, de nouvelles propriétés et de nouvelles applications, avec des défis de taille scientifiques et technologiques à relever et des enjeux économiques et stratégiques colossaux. Est-ce le début d'un nouvel Age d'Or ou du Crépuscule de l'Humanité ? Tout dépend ...!

Remerciements : L'Auteur de l'Article tient à exprimer ses très chaleureux remerciements aux responsables et Staff de la revue COST, en particulier, aux Professeurs BOUAZIZ & SEBBAR, pour l'invitation à publier cette modeste contribution dans cette revue COST, Revue scientifique éditée par l'ENSET-Oran qui est une source de fierté pour l'ensemble de la communauté scientifique nationale.

Références :

1. <http://www.mrs.org> : "Materials Research Society, USA" MRS Website : Materials News, Feb 2007.
2. <http://www.spie.org> : "The International Society for Optical Engineering, USA", SPIE Website : - News Room, Technical Articles , Feb. 2007.
3. "Small is different" , in Nature Nanotechnology, Vol. 1, N°1, October 2006.
4. "Fabrication of Sub-45-nm Structures for the next generation of devices", MRS Bulletin, Vol. 30, N°12, December 2005.
5. "Le Nanomonde : de la science aux applications", in "Les Clefs du CEA" (Commissariat à l'Energie Atomique Français) N°52, Eté 2005.
6. " Les Nanotechnologies vues par la Physique", A. Kadri, in Proceedings of "Nanotech'1", Oran, Algeria, December 2005.
7. " Advanced Nanostructured Semiconductor Heterostructures for Nanotechnology", A. Kadri, Invited Conference in International Meeting on Materials for Electronic Applications, IMMEA07 Marrakech, Marocco, April-May 2007.
8. "Les nanotechnologies : Espoirs et craintes pour le développement durable", A.Kadri, Conférence invitée à ICRES'D'07, Tlemcen, Algérie, Mai 2007
9. <http://www.unep.org>: UN Reports Unep, Feb. 2007