

Catherine BRÉCHIGNAC



Catherine Bréchnignac est Directeur de recherche au CNRS. Ancien Directeur Général de ce grand organisme de recherche, elle est actuellement Présidente de l'Institut d'optique théorique et appliquée, et du Palais de la Découverte. Après sa thèse en 1977, elle a exploré un nouveau champ, interdisciplinaire, situé à la frontière de la physique atomique et de la matière condensée: la physique des amas (clusters), précurseurs des nano-objets. Constitués de quelques atomes à quelques milliers d'atomes, ces agrégats permettent d'étudier la matière à l'échelle du nanomètre et créent des ponts entre la physique atomique, la physique moléculaire et la physique du solide.

Les travaux scientifiques de Catherine Bréchnignac lui ont valu un Prix de l'Académie des Sciences en 1991, la médaille d'argent du CNRS en 1994, la médaille et le prix Holweck en 2003, prix décernés conjointement par les sociétés britannique et française de physique ; ils l'ont conduite à être nommée Docteur honoris causa de l'Université Libre de Berlin en 2003, élue Membre étranger de l'Académie Américaine des Sciences et des Arts en 1999, Membre de l'Académie des Technologies en 2000, Membre de l'Académie des Sciences en 2005.

Catherine Bréchnignac a toujours exercé une influence multiforme dans la science internationale ainsi que dans la politique scientifique : en France, elle fut la fondatrice du réseau « Clusters » (1991) et assumait des fonctions de direction successive au CNRS : directeur du Laboratoire Aimé Cotton (1989-1995), directeur du Département Mathématiques et Physique, puis directeur général du CNRS (1997-2000) ; en Europe elle a été présidente de la réunion des conseils scientifiques des organisations de recherche de l'union Européenne (1998-2000), membre ou présidente de nombreux comités de l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée (1990-1994), ou membre du bureau éditorial de plusieurs revues périodiques de publications scientifiques.

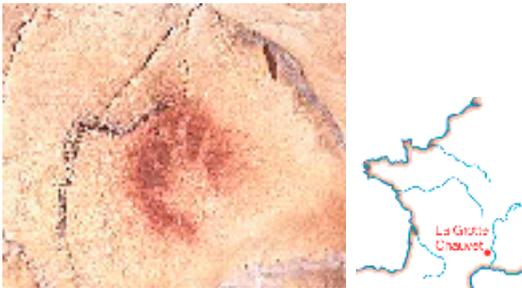
Catherine Bréchnignac a été récemment élue présidente du Conseil International de la Science, lors de l'assemblée générale de Suzhou (Chine), pour un mandat qui débutera en 2008.

Les défis des nanotechnologies

Les nanotechnologies ont aujourd’hui un impact important sur le grand public. Elles attirent, mais engendrent aussi des craintes. Je les présenterai ici en tant que physicienne, même si certains exemples se rapportent à d’autres disciplines.

PETITE HISTOIRE DES NANOTECHNOLOGIES

Les nanotechnologies existent depuis très longtemps. Il y a 31 000 ans, l’homme préhistorique les utilisait déjà en soufflant des grains pigmentés sur sa main, pour laisser ses empreintes sur les parois des grottes et cavernes.



Voici par exemple une empreinte de main. Je la trouve assez émouvante, elle a été découverte dans la grotte Chauvet, en décembre 1994. Elle est datée grâce au carbone 14 à 31 000 ans.

Dans cette même grotte, se trouvent aussi des fresques : celle d’un ours rouge, ou celle de chevaux noirs et d’un rhinocéros. Elles sont dessinées avec de fines particules de carbone. Peut-être ces particules contiennent-elles des structures de nano-tubes !



En effectuant un saut de plusieurs milliers d’années, on trouve au 8^{ème} siècle, que les Chinois avaient découvert la poudre noire. Cette poudre a d’abord été utilisée pour des feux d’artifice, puis à des fins militaires, et ceci bien avant de comprendre que la cinétique de combustion était inversement proportionnelle à la taille des grains. Dans ce sens, on constate que la technologie existait avant la compréhension des concepts scientifiques.



Plus proche de nous, on peut s'intéresser aux vitraux des cathédrales.



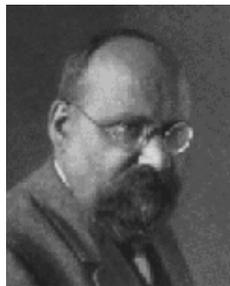
Saint Nicolas de Port

L'origine de leurs couleurs a d'abord été évoquée par Faraday. Il les attribuait à des grains pigmentés, les mêmes que ceux trouvés dans les peintures rupestres. Insolubles dans leur environnement, (dans le cas des vitraux le verre) ils donnent aux verres leurs couleurs.

Mais il a fallu attendre 1907, pour que Mie donne l'explication de ces couleurs en considérant la diffusion de la lumière par les particules. Nous verrons ensuite des exemples de l'évolution de la couleur en fonction de la taille des particules en particulier pour des particules de la taille du nanomètre.



Faraday



Mie

La diffusion de la lumière par les nanoparticules existe partout. Elle existe aussi dans le milieu interstellaire, et vous voyez là la nébuleuse tête de cheval dans la constellation d'Orion. La couleur rouge est due à la diffusion de Mie sur les grains de poussière carbonée qui se trouvent dans le milieu interstellaire.

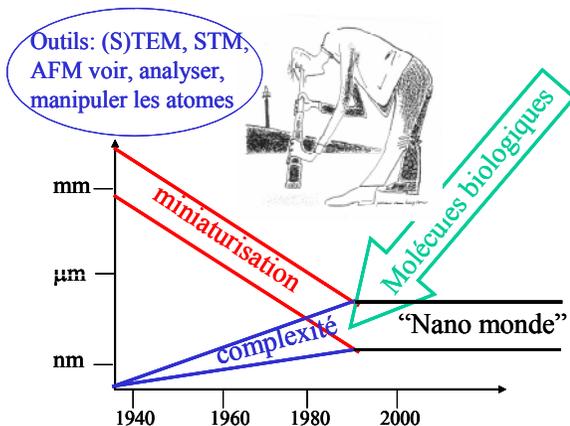


Anglo-australian Observatory

Après ce bref historique, on peut dire que la science et la technologie sont liées depuis toujours. On ne peut concevoir de faire de la science sans faire d'expérience, ni d'expériences sans faire de technologie. Parfois, les concepts devancent les réalisations, parfois, c'est l'inverse. Il est vain de dire qu'il faut d'abord comprendre avant d'appliquer. Les deux vont de pair : il faut avancer dans les deux directions et il n'y a pas de relation d'ordre hiérarchique entre science et technologie.

POURQUOI L'ÉMERGENCE DES NANO-OBJETS ?

Entrons dans le vif du sujet. D'où vient l'émergence du concept du nano-objet ? Cette notion n'est pas arrivée par hasard. Elle s'est construite au cours du temps. Si l'on porte, en fonction des années la taille des particules, ou des systèmes étudiés, on remarque que l'une des forces motrices de la technologie a été la **miniaturisation des systèmes**. Le but était de diminuer la tailles des systèmes tout en conservant leurs propriétés afin de gagner en quantité de matière et donc en coût de production, tout en réduisant la pollution.



En 1959 R. Feynman, lors du congrès de l'American Physical Society (APS) s'était posé la question «*Pourrait-on un jour stocker les 25 millions de volumes du British Muséum dans une tête d'épingle ?*» S'il pensait en terme de miniaturisation, ce

n'est néanmoins pas lui, comme on le voit souvent dans la presse, qui a eu l'idée du concept « nano-».

Dans le même temps, alors qu'on diminuait la taille des systèmes les scientifiques, au niveau plus conceptuel, ont essayé de comprendre la **complexité** en construisant des édifices atome par atome. En fait, c'est dans les années 90, que la miniaturisation a commencé à buter sur des limites fondamentales avec des systèmes dont les propriétés dépendent de la taille. Au niveau des systèmes complexes, l'étude d'objets dont la taille devient plus petite que la portée de la propriété étudiée ouvre un champ totalement nouveau. Ce domaine de taille est aussi celui des **molécules biologiques**. C'est l'existence de ce point de convergence en taille qui fait que l'on est maintenant capable d'associer nano-systèmes, nano-objets et molécules biologiques.

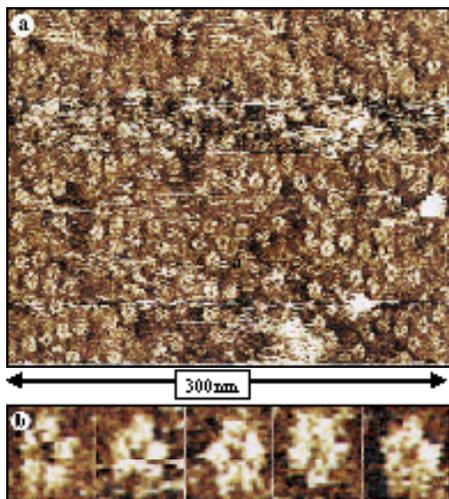
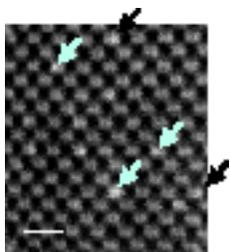
VOIR

Une avancée importante dans l'étude des objets à l'échelle du nanomètre, échelle où chaque atome supplémentaire compte et modifie ses propriétés, fut de les « voir ». Cette étape fut possible grâce aux efforts accomplis en microscopie électronique, qui permet de sonder la matière en la bombardant avec des électrons énergétiques. Ensuite, avec la construction d'outils tels que les microscopes à force atomique (AFM) et les microscopes par effet tunnel (STM),

on a su non seulement voir, analyser, mais aussi manipuler les atomes. C'est cette convergence d'outils et d'idées qui a donc fait émerger le préfixe « nano ».

Je ne peux pas résister à vous montrer une image de microscopie électronique, obtenue avec un des microscopes parmi les plus performants actuellement au monde. L'image montre une surface de silicium, mais sonde en réalité plusieurs couches superposées et l'on observe les colonnes d'atomes.

Lorsqu'un atome de silicium est remplacé par un atome de bismuth qui répond plus fortement à l'excitation électronique, on observe des points plus blancs.

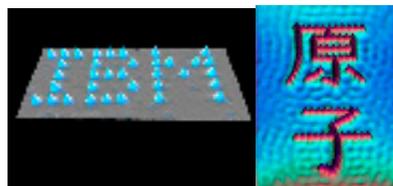


Obtenu par le groupe de Zsho en 1995.

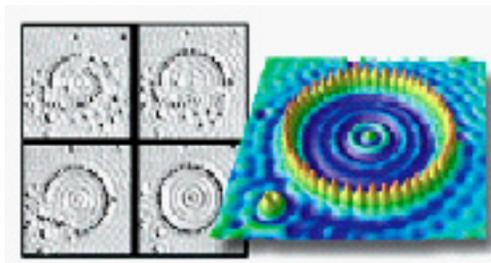
On peut comme cela « voir » les atomes. En fait, ce sont les électrons que l'on excite. Ci-dessus, est présentée une des premières images, obtenue en AFM, sur la toxine du choléra. Il y en a maintenant de beaucoup plus belles.

MANIPULER

Au-delà de voir, on sait aujourd'hui « manipuler », les atomes pour écrire à l'échelle atomique. Cette image a fait le tour du monde. Elle a été obtenue par agencement d'atomes pour écrire IBM avec le premier microscope à effet tunnel mis au point par IBM. Un autre exemple, le mot « atome » écrit en japonais.



Un troisième exemple montre la construction d'un corral d'atomes de fer, ayant 14 nano-mètres de diamètre, sur une surface de cuivre. Sur la partie gauche de l'image,



tous les points noirs sont des atomes de fer. Lors de la construction du corral on observe des franges dues aux électrons des atomes de la couronne qui interagissent entre eux. L'image de droite, montre 48 atomes de fer sur une surface de cuivre.

On est donc capable maintenant de manipuler les atomes, de les positionner comme on le désire.

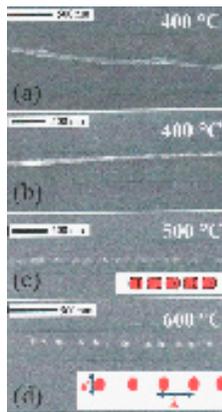
DES ÉDIFICES INSTABLES

Si manipuler à notre convenance, afin de construire des nano-structures artificielles, est possible on doit se poser la question : ces nano-édifices sont-ils stables ? En effet, comme ces châteaux de cartes, ces structures peuvent être instables. Leur réorganisation vers une structure énergétiquement plus favorable est parfois inévitable.



Voici l'exemple d'un nano-fil de cuivre de quelques dizaines de nanomètres de diamètre que l'on chauffe jusqu'à une température de 600°C.

L'image ci-après montre le nano-fil de cuivre à des températures de 400°C, 500°C et, 600°C. Lorsque la température augmente

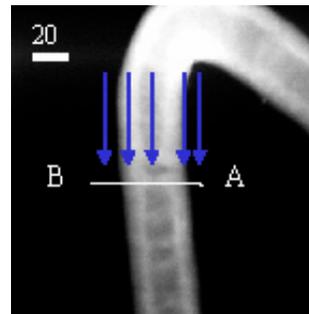


Toimil Morales
A.P.L. 85, 5337

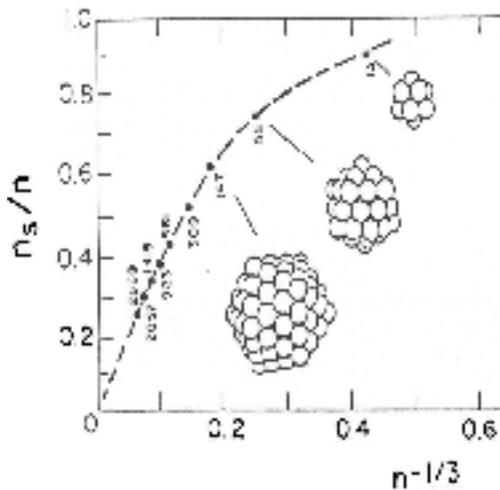
le nano-fil se comporte comme un jet de liquide en donnant une série de gouttelettes uniformes et équidistantes à des températures très inférieures à la température de fusion d'un fil de cuivre macroscopique (1083°C). Cette fragmentation peut apparaître aussi lors du passage d'un courant dans le nano-fil.

ANALYSER

Il ne suffit pas de « voir », de manipuler, de tester la stabilité des nano-systèmes, il faut aussi les connaître chimiquement. Ceci peut se faire grâce à un microscope électronique avec lequel on mesure la perte d'énergie des électrons lorsqu'ils traversent un objet. L'énergie perdue par les électrons du microscope est la signature de l'élément chimique rencontré. Ceci s'obtient en déplaçant le faisceau d'électrons de A vers B. On est actuellement capable de détecter ainsi un atome dans un nano-tube.



C. Colliex - Orsay



Rapport du nombre d'atomes en surface et du nombre d'atomes en volume en fonction de la taille de la nanoparticule.

EFFET DE TAILLE

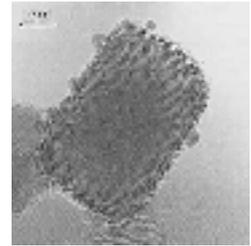
Lorsque l'on diminue la taille d'une nano-particule le rapport entre le nombre d'atomes en surface et le nombre d'atomes en volume augmente. Partant d'un solide macroscopique où pratiquement tous les atomes sont en volume on arrive à une particule de 13 atomes où tous les atomes sauf un sont en surface.

La réactivité des atomes de surface étant différente de celle des atomes en volume, les nano-particules seront en général beaucoup plus réactives qu'un morceau de solide macroscopique.

C'est le cas tout à fait extraordinaire de la réactivité des nano-particules d'or. L'or

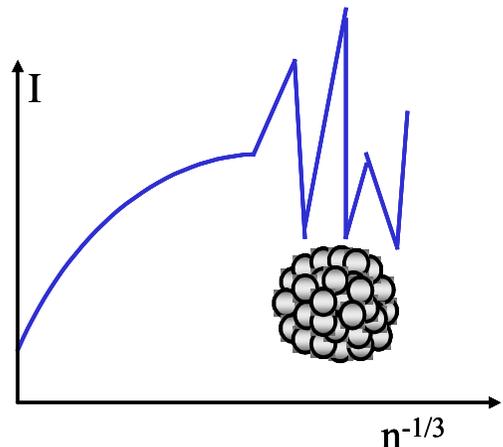
*TiO₂ = oxyde de titane

est un métal noble. Il est inerte à l'échelle macroscopique, mais lorsque les particules d'or deviennent de plus en plus petites, l'or présente une réactivité catalytique exceptionnelle pour l'oxydation de CO par exemple. L'image ci-contre montre des particules d'or de 10 nanomètres de diamètre, déposées sur une surface de TiO₂*.



Au Japon, Mazatake Haruta, professeur à l'université de Tokyo, a eu les moyens de créer un institut intitulé « Green Technology Institute », ce qui veut dire Institut des technologies vertes, parce que, du point de vue catalytique, l'oxydation du CO peut se faire sur des particules non polluantes.

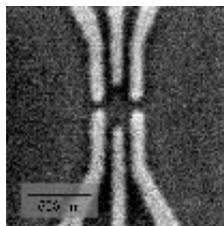
D'une manière générale, la variation continue du rapport surface sur volume entraîne une évolution continue des propriétés de l'objet jusqu'à des dimensions telles que la portée de la propriété étudiée devienne plus grande que la taille de l'objet.



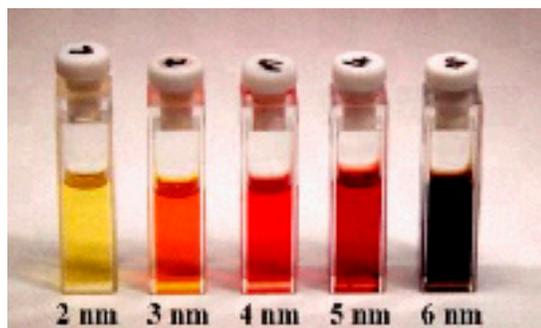
On entre alors dans le domaine des effets quantiques de taille. Les nano-particules ne se comportent plus comme un petit morceau de solide macroscopique, les lois d'échelle ne sont plus valables. C'est le domaine de taille où chaque atome compte !

EFFET QUANTIQUE DE TAILLE

Actuellement, on est capable de faire des micro systèmes électromécaniques que l'on appelle des MEMS dans lesquels les électrons passent un à un dans un transistor.



Un autre exemple d'effet de taille concerne la couleur des nano-particules de séléniure de cadmium.



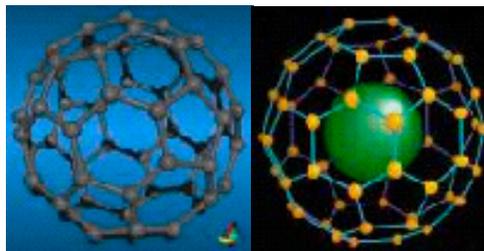
Lorsque la taille des nano-cristaux croît de 2 nanomètres à 6 nanomètres (1 nanomètre est un milliardième de mètre) la couleur du liquide comprenant des nano-cristaux évolue du jaune au brun, changer

la taille dans ce cas c'est changer considérablement la couleur.

LES DÉFIS DES NANOTECHNOLOGIES

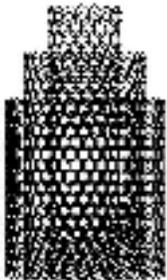
Les nanotechnologies consistent essentiellement à développer des procédés qui permettent de réaliser des dispositifs fonctionnels à l'échelle de quelques nanomètres, voire quelques dizaines de nanomètres, en un temps raisonnable, et de les dupliquer en grand nombre. Il ne suffit donc pas de faire un prototype, il faut aussi savoir fabriquer à grande échelle ce genre d'objet. C'est le cas des nouvelles formes d'objets en carbone.

L'histoire des nouvelles formes de carbone à l'échelle du nanomètre est instructive. De tout temps le carbone à l'échelle macroscopique s'est présenté sous deux formes organisées : le graphite ou le diamant. Au début des années 80 Richard Smalley qui fabriquait des clusters d'atomes de carbone a découvert un édifice de 60 atomes particulièrement stable. La seule possibilité pour comprendre cette stabilité particulière était de concevoir une sphère de carbone. Il a reçu pour cette découverte le prix Nobel de chimie en 1985.

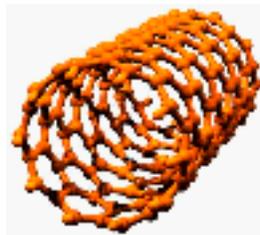


Les applications de ces fameuses sphères de carbone 60 n'ont pas été à la hauteur de ce que l'on imaginait car ces sphères sont inertes, même si actuellement on sait introduire des atomes plus réactifs à l'intérieur.

En revanche, la découverte par Sumio Iijima en 1991 des nano-tubes de carbone, fut plus riche en développement. Il s'agit de feuillets de plan graphitique roulés en tubes.

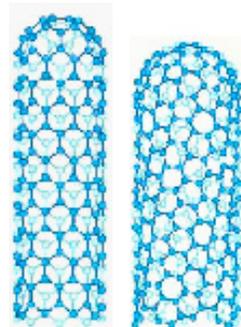


S. Iijima 1991 $\Phi \sim 1.4 - 100 \text{ nm}$



S. Iijima & D. Béthune 1993

Très rapidement, en 1993 Iijima et Béthune ont été capables de réaliser des nano-tubes de carbone à une seule paroi. Ces nano-tubes de carbone, 50 000 fois plus fins qu'un cheveu, ont des propriétés intéressantes. Selon leur hélicité ils sont soit métalliques soit semi-conducteurs.



Leur stabilité est particulièrement grande, et il est possible de

les utiliser comme nanoconducteurs électriques permettant une densité de courant de l'ordre de 10^9 ampères par cm^2 . Ceci est à comparer à la densité maximale que supporte un fil macroscopique de cuivre qui est de 10^6 ampères par cm^2 .

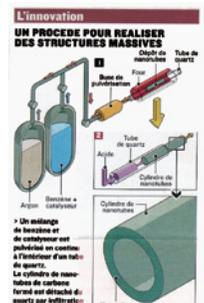
Ils sont aussi mécaniquement très résistants. Trois fois plus résistant que les fils d'une toile d'araignée, le matériau naturel le plus « tenace » sur terre.



On sait actuellement tisser des nano-tubes de carbone pour fabriquer des toiles de nano-tubes. Il suffit d'une toile de quelques grammes pour arrêter une balle de pistolet.

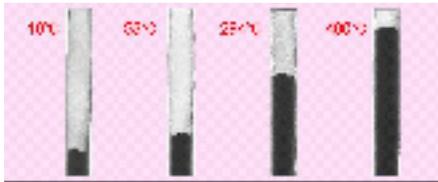


Les nano-tubes de carbone, de par leur maillage très fins, sont aussi utilisés comme filtres de particules.



Usine Nouvelle,
2 décembre 2004

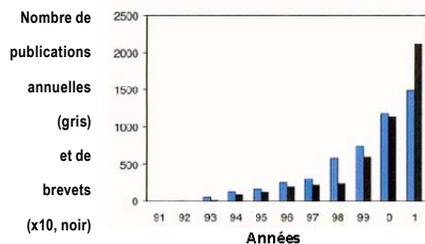
Dans le livre des records, on peut trouver le plus petit thermomètre ! Il est formé d'un nano-tube de carbone à paroi unique empli de gallium. Lorsque la température varie le niveau du gallium dans le nano-tube varie.



Y.Bando, Nature, Fev.2002

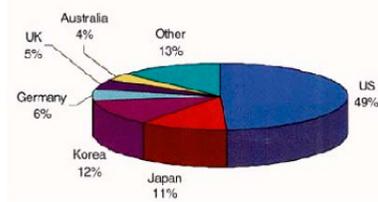
Cependant à cette échelle les propriétés thermodynamiques ne sont plus celles d'un liquide macroscopique. La mouillabilité du gallium sur le carbone est différente et la mesure de la température n'est pas reproductible. On arrive ici à la limite en taille des petits systèmes. En revanche les problèmes posés sont extrêmement intéressants.

Toutes ces applications des nouvelles formes de carbone à l'échelle manométrique sont à l'origine de l'intérêt croissant porté aux nano-tubes. Le nombre de publications et de brevets les concernant croît exponentiellement depuis 10 ans.



R.H. Baughman, A.A. Zakhidov et W. de Heer Science 2002

Si les contributions des publications scientifiques proviennent autant de l'Europe que des Etats-Unis ou de l'Asie, la répartition en matière de brevets est différente.

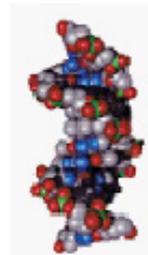
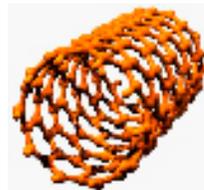


Répartition des brevets par pays

Les brevets sont pris essentiellement par les Etats-Unis, la Corée et le Japon, et la contribution de la France est assez inexistante.

COMPATIBILITÉ DE TAILLE AVEC LES MOLÉCULES BIOLOGIQUES

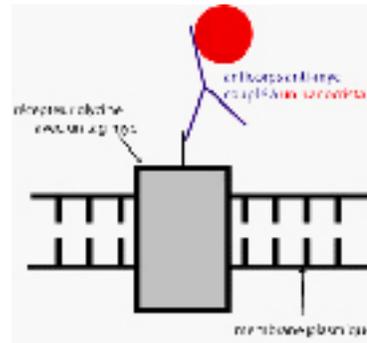
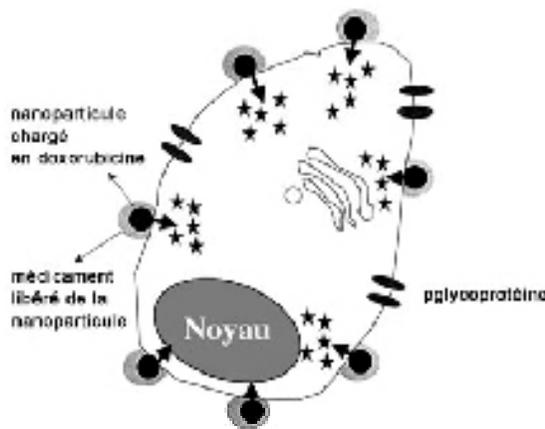
Diminuer la taille des particules, augmenter la complexité, permet d'envisager l'interface avec les molécules biologiques dont les tailles sont nanométriques. Par exemple la molécule d'ADN a un diamètre de l'ordre de 2nm du même ordre de grandeur que le diamètre des nano-tubes de carbone.



Que peut-on faire avec cette compatibilité en taille? Une des possibilités appartient au domaine médical et a pour but de permettre la vectorisation des médicaments. Plutôt qu'administrer le médicament par voie orale, ce qui peut provoquer des effets secondaires néfastes, il peut être préférable d'incorporer des molécules actives dans des nano-particules bioadhésives.

vre le mouvement de cette dernière. C'est ce qu'a réalisé une équipe INSERM-ENS-CNRS .

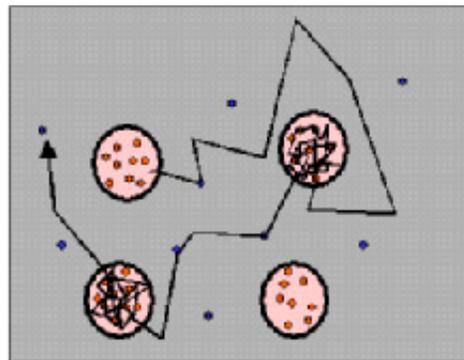
34
Les défis
des
nano-
techno-
logies



A.Triller ; M.Dahan SCIENCE 302: 442-445-2003-

La protéine se déplace dans la membrane en mouvement brownien - c'est-à-dire un mouvement aléatoire, puis elle s'arrête en certains sites et se déplace à nouveau.

La cible atteinte, le médicament pourra se libérer continûment à travers la membrane de la cellule, et aura une efficacité ciblée. C'est aujourd'hui un défi technologique que de trouver les bonnes nano-particules capables de s'adapter aux cellules.



A.Triller ; M.Dahan SCIENCE 302: 442-445-2003-

Les nano-particules peuvent présenter aussi un intérêt pour l'imagerie cellulaire. En effet une nano-particule de sélénure de cadmium, qui fluoresce aisément accrochée à une protéine membranaire permet de sui-

LES DÉBATS SUR LES « NANO »

Cependant, les nano-particules inquiètent et l'on peut lire dans la presse : « les risques pour la santé publique liés à l'usage incontrôlé des nanotechnologies ont engendré un vaste débat de société aux Etats-Unis. » Les nano-particules ne sont ni plus ni moins dangereuses aujourd'hui qu'hier. Il est nécessaire comme pour toute chose d'en analyser la toxicité avant de les employer.

Parce qu'on ne les voit pas et qu'elles réagissent, les nano-particules ont un plus grand impact sur l'imaginaire. Dans son livre « *Engines of creation* », publié en 1986, Eric Drexler a essayé d'imaginer tout ce qu'on pouvait faire avec les nano. Selon lui, la manipulation de la matière au niveau de l'atome peut créer d'abord un futur d'abondance utopique, où tout pourrait être rendu meilleur marché, où tous les problèmes seraient résolus à l'aide de la nanotechnologie et de l'intelligence artificielle...« *Un dispositif de quelques nanomètres pourrait s'introduire dans le corps sans rien endommager, muni de capteurs, il pourrait renvoyer au médecin des images précises facilitant le diagnostic* ». « *Des nano-robots injectables dans le corps humain pourrait également soigner, etc.* ». Le livre évoque aussi la possibilité d'assembleurs capables de se reproduire eux-mêmes. Ici, le passage de la description scientifique à la science fiction est flou et présente un danger pour un lecteur non averti. Au 19^{ème} siècle Jules Verne a su quant à lui nous montrer clairement la différence.

Naguère, le progrès était source de bienfaits. Aujourd'hui il devient menaçant. Cela provient du fait que l'assimilation des connaissances par la société ne suit pas l'évolution rapide qu'elle engendre. Les peurs que cela suscite sont entretenues par ceux qui vivent des émotions qu'elles portent. Au 19^{ème} siècle par exemple, le train à vapeur faisait peur. Il était considéré comme très dangereux pour le métabolisme, aujourd'hui on roule sans problème à 300 km/heure. Des craintes de même nature existent maintenant à propos des téléphones portables.

SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Pour terminer, je dirai que si la science et la technologie fascinent, c'est parce qu'elles flirtent en permanence avec ce qui est en fait inimaginable. Actuellement, l'interaction homme/machine est quelque chose de passionnant quant à ses répercussions sur la société. Rêvons un peu, on se demande même, dans l'univers multimédia, 'quand serons nous capables de fabriquer de l'odorat, du goût... ?'.

A la question 'le progrès est-il bon ou mauvais ?', je réponds qu'il est bon, à condition qu'il aille toujours de pair avec une éducation, afin de responsabiliser les individus et les sociétés. C'est seulement en prenant appui sur cette éducation et cette responsabilisation commune que nous pourrions résoudre les problèmes que posent certains aspects, les plus aigus, du progrès.

Pour finir, je citerai la phrase de Jean Guéhenno, que vous pouvez lire sur la maison où il a vécu les vingt dernières années

de sa vie, 37 rue Pierre Nicole à Paris: « *Les peuples, comme les hommes, se mesurent à leurs rêves* ».

Je vous remercie.

Catherine BRÉCHIGNAC

Directeur de recherche au CNRS

Membre de l'Académie des Sciences

Membre de l'Académie des Technologies

36

Les défis
des
nano-
techno-
logies

cité LES NANO- TECHNOLOGIES

Conférences le samedi à 10h 30
Entrée libre

7 janvier

NANOTECHNOLOGIES : DE QUOI S'AGIT-IL ?

Catherine Br chignac, *physicienne, CNRS*,
Arie Rip, *philosophe des sciences et des technologies,*
université de Twente, Pays-Bas.

14 janvier

NOUVEAUX MAT RIEAUX : NOUVEAUX RISQUES ?

Christian Colliex, *physicien, CNRS, université Paris-Sud*,
Hervé Arribart, *physicien, directeur scientifique*
de Saint-Gobain, Annik Laisseau, *physicienne, Onera*,
Olivier Witschger, *ingénieur de recherche, INRS*

21 janvier

DE LA MICROÉLECTRONIQUE   L'ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE

Michel Brillou t, *ingénieur technologue, CEA-Let*,
Gérald Dujardin, *spécialiste des machines*
moléculaires, CNRS, Françoise Roue, * conomiste,*
Conseil général des technologies de l'information.

Avec le soutien de



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

En partenariat avec

Conférences & M di es
science

28 janvier

DIAGNOSTIC ET THÉRAPIE : LA RÉVOLUTION DES NANOS

Jean-Marc Gagnat, *directeur scientifique de la recherche*
technologique au CEA, Mono2Life, Patrick Couvreur,
professeur de pharmacie, université Paris-Sud,
Maxime Dahan, *directeur de l'équipe optique et biologie,*
ENS, CNRS, Bernadette Bensaude-Vincent, *professeur*
d'histoire et de philosophie des sciences à l'université
Paris-X.

4 février

LES ENJEUX ÉTHIQUES DES NANOS

Louis Laurent, *responsable du secteur matière*
et information du GIPAMR, Alexei Grinbaum, *physicien*
et philosophe, CNRS, université Nancy-II,
Claude Weisbuch, *physicien, université de Santa*
Barbara,  tats-Unis, CNRS, Genewave.

Autour, entrée libre dans la limite des places disponibles.



coll ge de la cité

Informations 01 40 05 35 96

cite-sciences.fr/collge

Porte de la Villette