



LES CAHIERS DE L'UNIVERSITE DES LYCEENS

NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES : UNE NOUVELLE FRONTIERE ?

SEANCE DU 10 NOVEMBRE 2005,

*Avec Jean-Pierre Launay, agrégé de chimie, professeur des Universités
Et Thierry Gaudin, polytechnicien et ingénieur général des Mines*

LYCEE GENERAL ET TECHNOLOGIQUE DE MIREPOIX (ARIEGE)

120 lycéens accompagnés de leurs enseignants ont assisté à cette séance. Issus de six classes de filières S et L, ils provenaient du lycée d'accueil, mais aussi des lycées Généraux et technologiques Castella, à Pamiers, et Gabriel Faure, à Foix.



www.agrobiosciences.org

Une expérience pilote en Midi-Pyrénées

En France et en Europe, la régression des effectifs étudiants dans certaines filières scientifiques préoccupe les pouvoirs publics. Ce phénomène pose à moyen terme le problème du renouvellement des cadres scientifiques et techniques, des enseignants et des chercheurs. De plus, la faible inscription des sciences dans le champ de la culture générale risque de nuire au nécessaire débat démocratique sur les choix d'orientation de la recherche et de ses applications. Sur ces considérations, la Mission d'Animation des Agrobiosciences (MAA) a initié l'Université des Lycéens à partir de la rentrée scolaire 2003. .

La connaissance et la culture scientifiques au cœur des rapports entre la science et la société

La MAA, créée dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région Midi-Pyrénées, a pour vocation aux plans régional et national de favoriser l'information et les échanges sur les questions vives que pose la science dans la société, ainsi que de contribuer à éclairer la décision publique. Elle est à l'initiative de l'Université des Lycéens : une série de rencontres dans les établissements de Midi-Pyrénées, visant à rapprocher les chercheurs, les professionnels, les lycéens et leurs enseignants. Une démarche menée en partenariat avec le Conseil Régional Midi-Pyrénées, l'Académie de Toulouse et le Cercle Pierre de Fermat.

Faire lien et donner du sens

Les principaux objectifs de l'Université des Lycéens consistent à :

- Inscrire les sciences et les technologies dans la culture générale afin de permettre aux jeunes de se forger un esprit critique,
- Contribuer à donner du sens aux savoirs scientifiques en montrant les passerelles entre les différentes disciplines, mais aussi les relations entre la science et le contexte économique et socioculturel de la société donnée, sans oublier le lien entre les savoirs et les métiers,

- Incarner la science et la recherche, à travers le parcours de scientifiques venus à la rencontre des lycéens pour raconter la science et dialoguer.

Une question, une trajectoire, un champ disciplinaire

- La découverte d'un champ disciplinaire à travers la conférence d'un scientifique, qui aborde sa trajectoire individuelle, l'histoire de sa discipline, ses grands enjeux, ses questionnements, ses perspectives.
- La confrontation des approches : en contrepoint du conférencier, un second intervenant apporte le point de vue d'une autre discipline ou d'un secteur professionnel en lien avec les recherches présentées,
- Un dialogue avec les lycéens : à l'issue de ces exposés, une heure entière est consacrée au débat entre lycéens et intervenants

La diffusion des contenus

- Chaque séance donne lieu à un « Cahier », restituant l'intégralité de la conférence et du débat, enrichie de notes explicatives et de ressources bibliographiques. Ces documents, mis en ligne et accessibles gratuitement sur le site de la MAA font l'objet de 4 000 à 5 000 téléchargements en moyenne chaque année.

LE SUJET

Voyage au cœur de l'infiniment petit

Du mini au nano

Il y a autant d'espaces à découvrir dans le monde de l'infiniment petit que dans celui de l'infiniment grand. Dans cette exploration de l'ultra-minuscule, les chercheurs vont de plus en plus loin, repoussant sans cesse les frontières de l'invisible, voyant désormais se dessiner les molécules et les atomes. A ces distances, le millimètre ne saurait suffire comme unité de mesure. Car c'est en milliardièmes de mètres que l'on calcule les dimensions, soit 0, 000 000 001 m... C'est là le nanomètre.

Pour parvenir à ces échelles, les scientifiques n'ont cessé de perfectionner les outils pour pouvoir examiner le « nanomonde ». Un microscope classique ne peut en effet y accéder. D'où l'intérêt de la fantastique invention du microscope à effet tunnel par deux chercheurs suisses, en 1986, qui permet non seulement de visualiser les atomes, mais également de les déplacer.

Pourquoi miniaturiser les objets et les outils ?

Au-delà de la connaissance, les enjeux de ces travaux de recherche, qui font aussi bien appel à la physique qu'à la chimie, la mécanique et à la biologie, concernent bon nombre de secteurs économiques.

Dépassant l'échelle des microtechnologies, les laboratoires savent désormais mettre au point de nouvelles molécules, fabriquées atome par atome. Celles-ci permettent la construction de nanocomposants et de nanosystèmes pour améliorer les performances de l'informatique, créer de nouveaux matériaux dotés de certaines qualités (le nanotube, par exemple, plus résistant et plus léger que l'acier) , des revêtements modifiés pour être auto-nettoyants, des prothèses et des implants bio-compatibles, ou encore de mini-robots pour explorer les artères...

Le vertige de l'infini

Comme dans la plupart des domaines de recherche, chaque avancée montre également l'étendue des progrès encore possibles. Sur le plan de la théorie, d'une part, car le comportement des atomes et des molécules n'obéit pas aux lois classiques de la physique, mais à des lois de mécanique quantique, découvertes au cours du 20^{ème} siècle. Sur le plan des outils, ensuite, car pour créer des objets de plus en plus petits, il faut bien mettre au point des instruments d'observation et de fabrication eux-mêmes de plus en plus petits... Une course sans fin qui, comme lorsqu'on observe l'étendue de l'espace dans un ciel étoilé, fascine et donne le vertige.

Voyage au centre de la matière

Son laboratoire est l'un des plus en pointe d'Europe sur le sujet. Des recherches sophistiquées, que Jean-Pierre Launay explique avec simplicité, donnant presque à voir et à toucher ces drôles d'objets que sont les constructions d'atomes et de molécules que son équipe met au point. Si la part du jeu n'est pas absente, les enjeux n'en sont pas moins considérables pour toute une série de secteurs industriels et pour répondre à un certain nombre d'attentes de la population, notamment en matière de santé. Il y a du Jules Verne dans ce voyage du 21^{ème} siècle au centre la matière, dans cette conquête d'espaces inconnus, jusque là jamais visualisés.

« Je vais essayer de vous donner quelques idées simples sur un certain nombre de recherches menées actuellement au sein du laboratoire que je dirige : le Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales, le CEMES, situé à Toulouse. Je vais essentiellement parler des atomes et de l'organisation de la matière à très petite échelle. Commençons par les échelles de distance : si vous divisez un mètre par mille, vous obtenez un millimètre. On peut encore voir les choses à l'œil nu. Mais en dessous du dixième de millimètre, ce n'est plus possible. Si je divise encore le millimètre par mille, j'arrive au micron qui constitue, cette fois, la limite du microscope optique. Celui-ci ne parvient pas à regarder en dessous du micron. Et si je divise encore par mille le micron, j'arrive au nanomètre. Pour les scientifiques, le nanomètre est noté 10^{-9} mètre, c'est à dire le milliardième de mètre. Si j'ai un microscope qui peut

Jean-Pierre Launay

Agrégé de Chimie, Docteur ès-sciences, Jean-Pierre Launay est professeur à l'Université Paul Sabatier (Toulouse) et Directeur du Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales (CEMES), Unité propre du CNRS à Toulouse.

Ses travaux de recherche portent sur l'Electronique Moléculaire et les Nanosciences. L'enjeu : mettre en œuvre des molécules spécialement conçues pour jouer le rôle de composants électroniques ou même d'éléments de machines de taille nanométrique. Les techniques pratiquées dans son groupe sont la chimie de synthèse, les spectroscopies et méthodes physico-chimiques de caractérisation, les microscopies à champ proche, et enfin la modélisation moléculaire.

grossir un million de fois un objet de un millimètre– et nous allons voir que cela existe – je peux donc distinguer le nanomètre.

Les atomes sont encore plus petits. Ils se mesurent en angström¹, c'est à dire en dixième de nanomètre.

Pour vous donner une idée de l'espace considérable à franchir entre le millimètre et le nanomètre, imaginez une plongée à travers un morceau d'aluminium. Au grossissement 100, on commence à voir de petits défauts, de petites anfractuosités ; c'est ce que vous verriez avec un grosse loupe. Puis on commence à distinguer des grains d'aluminium et, à un grossissement supérieur à un million, grâce au microscope électronique, on constate que la matière n'est pas continue : les points que l'on distingue sont des atomes². Ce sont les unités de matière élémentaires.

Dans l'univers des atomes

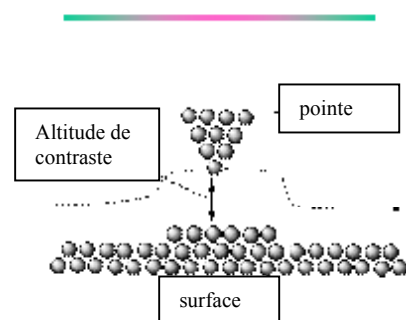
Les atomes ont été imaginés bien avant notre ère par un philosophe grec, Démocrite. Celui-ci avait imaginé que la matière ne pouvait pas être coupée à l'infini et que, à un moment donné, il y avait une unité indivisible appelée atome. Ce qui est incroyable, c'est que Démocrite n'avait aucun instrument pour étayer cette idée : c'était une pure spéculation. Ce n'est que très longtemps après, vers le XIX^{ème} siècle, que d'autres savants, découvrant l'électron – une particule de charge électrique négative qui se situe autour de l'atome, se sont rendus compte indirectement que les atomes devaient effectivement exister. Et enfin, depuis peu de temps, nous pouvons désormais les voir. Ainsi, dans les années 80, au sein du laboratoire toulousain d'optique électronique (l'ancien nom du Cemes), un certain nombre de chercheurs ont réussi à distinguer des atomes par le biais de méthodes sophistiquées. Et depuis, la technique n'a cessé d'être perfectionnée, pour obtenir des images d'une très grande qualité optique de manière presque routinière.

Cela dit, je voulais essentiellement vous parler d'un autre type de microscope : le microscope à effet tunnel, apparu il y a une vingtaine d'années à peine. Il s'agit d'un engin fantastiquement simple. Je vous explique : prenez une pointe métallique et approchez-la le plus près possible d'une surface métallique. Si vous appliquez une tension entre les deux et que vous mettez en contact la pointe avec la surface, cela produit un court-circuit, donc un courant qui passe. Mais si l'on arrête cette pointe très légèrement au-dessus de la surface, à une distance de l'ordre du nanomètre, il reste du vide entre la pointe et la surface. Le vide étant un isolant, même si l'on applique une tension entre les deux, le courant ne passe pas. C'est du moins ce que l'on apprend à l'école. Mais à toute petite échelle, lorsque la pointe se termine

par quelques atomes, ce n'est plus tout à fait vrai. Car on observe alors des effets appelés « effets quantiques »³ : les électrons peuvent quand même passer entre le métal et la pointe, dans un sens comme dans l'autre. On appelle ce phénomène un « courant tunnel ». Ce courant est donc un indicateur de distance absolument fantastique pour les très petites échelles.

On pourrait comparer la pointe à un avion survolant une surface et équipé d'un radio-altimètre mesurant en permanence la distance par rapport à la surface. Nous procédons de la même façon : avec un système électronique, nous ajustons la hauteur de la pointe de manière à ce qu'elle reste à un nanomètre, par exemple, au-dessus de la surface. Puis, on déplace cette pointe avec des systèmes sophistiqués qui, avec une très grande précision, nous permettent de toujours maintenir la pointe à la même distance au-dessus de la surface même si celle-ci n'est pas lisse, à la manière d'un avion de chasse faisant du suivi de terrain à très basse altitude : son radio-altimètre permet d'ajuster constamment l'altitude par rapport au sol en cas d'obstacle. Nous obtenons ainsi un profil de la surface, où les reliefs sont constitués de couches supplémentaires d'atomes.

EN RASE-MOTTES SUR LES ATOMES...



Suivez la pointe

Ce qui est extraordinaire et totalement nouveau, c'est que non seulement nous pouvons faire une cartographie du matériau, comme on le fait d'un paysage, y compris en trois dimensions, mais que nous pouvons en plus agir sur cette matière. Car avec la pointe qui vient presque toucher la surface, nous pouvons pousser des atomes ! En effet, par une sorte d'attraction, un atome reste à proximité de la pointe. Si on déplace la pointe, l'atome suit. Imaginons que j'ai un grain de poussière sur cette table, je pousse ce grain, puis je relève la pointe : j'ai mis le grain de poussière là où je le voulais. Ceci est révolutionnaire car nous disposons là d'un appareil qui devient un outil de fabrication à très petite échelle.

Que peut-on en faire avec cet outil ? D'abord on commence par jouer ! Des chercheurs d'IBM se sont ainsi amusés à fabriquer un cercle d'atomes de fer sur une surface de cuivre. Ils les ont poussés avec la pointe jusqu'à faire un rond qu'ils ont appelé le « corral quantique ».



D'autres ont dessiné un petit bonhomme avec des molécules de monoxyde de carbone, déposées sur une surface de

platine. Ce sont là des tours de force qui ont permis de montrer les fantastiques possibilités offertes en déplaçant les molécules. En tant que chimiste, je suis très sensible à cet aspect. Car désormais, nous pouvons voir la structure interne de la molécule, les atomes qui la constituent ou encore la répartition des électrons à l'intérieur de ces molécules. Tout cela est très récent : cela ne date que de quelques années.

Non seulement nous voyons donc les atomes, mais on peut les tourner, les toucher, les déplacer... Nous sommes là un peu dans la situation du bébé qui commence à voir des objets au-dessus de lui, à tenter de les attraper : c'est au moment où il les touche qu'il se rend compte qu'ils sont réels, que ce n'est pas simplement une image sur sa rétine. Car voir, ce n'est pas seulement avoir une image qui se projette sur la rétine, c'est en même temps se faire une représentation mentale étayée par le fait que le mouvement correspond à l'image.

Un milliard de transistors sur un seul composant

Reste à savoir ce qu'on peut faire de ces atomes que nous pouvons voir et déplacer... L'idée la plus simple est celle inspirée de la microélectronique où l'on miniaturise de plus en plus les dispositifs, les micro processeurs, les mémoires, tout en obtenant de plus en plus de performance. C'est ce que l'on appelle la « loi de Moore », du nom de Gordon Moore, l'un des fondateurs de la société Intel. En 1965, celui-ci a eu une intuition de génie. A cette époque, l'industrie électronique commençait à intégrer des transistors⁴ à en mettre plusieurs sur une pastille de silicium pour faire de petits amplificateurs, des éléments de mémoire... Au bout de deux ou trois ans d'évolution de cette industrie, Moore a eu le sentiment que tous les 18 mois, le nombre de transistors que l'on était capable d'intégrer sur les plaquettes de silicium doublait. Et il

a formulé l'hypothèse qu'il s'agissait là d'une loi générale. Eh bien, cette loi ne s'est pas démentie et, en 2005, nous en sommes à des milliards de transistors que nous pouvons intégrer sur une plaquette de silicium, nous permettant d'obtenir des processeurs extrêmement puissants. Comment y est-on arrivé ? En diminuant sans cesse la taille des transistors. Si l'on avait gardé leur taille initiale, il nous faudrait un immeuble entier pour faire fonctionner le moindre micro-ordinateur. La miniaturisation est un énorme avantage au niveau de la technologie. Et celle-ci progresse tellement dans l'infiniment petit que certains ont imaginé pouvoir parvenir aux limites des atomes. C'est le projet de l'électronique moléculaire, qui utilise les molécules comme composant électronique car elles constituent des assemblages d'atomes. Reste à les positionner entre des conducteurs métalliques. Et là, il faut utiliser des astuces. Nous savons le faire. Par exemple avec une molécule faisant le pont entre deux électrodes. Nous pouvons ainsi mesurer le courant à travers cette molécule et même perturber le courant avec deux autres électrodes disposées en travers, ce qui constitue ce que l'on appelle un transistor à effet de champ.

Une encyclopédie dans une tête d'épingle

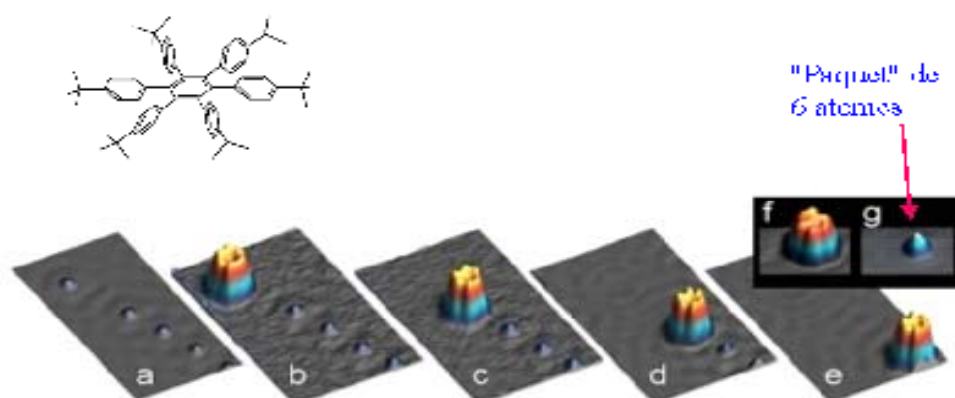
Explorons à présent le nanomonde. Je vous rappelle que « nano » signifie « très petit » et qu'un nanomètre est le milliardième de mètre ou le millionième de millimètre. Cette idée de « nano » vient d'un chercheur et enseignant américain, Richard Feynman, décédé en 1988. A la fin des années 50, ce grand professeur a prononcé une conférence visionnaire, imaginant les possibilités de la miniaturisation et affirmant qu'il y a énormément de place « en bas », dans le très petit. En miniaturisant les objets, nous gagnons en effet beaucoup de place. Il prenait comme exemple que l'on pourrait stocker une

encyclopédie entière sur une tête d'épingle. Aujourd'hui, cela nous paraît presque banal mais à l'époque, c'était incroyablement audacieux. Feynman avait même imaginé que, pour y arriver, il fallait des outils très petits. Or comment fabriquer ces outils très petits ? Avec d'autres outils et machines eux-mêmes de plus en plus petits... C'est le concept de nanomonde. Ce n'est pas là une simple acrobatie technologique : le nanomonde recouvre des enjeux importants, industriels et nationaux, dans plusieurs secteurs, au-delà de la micro-électronique. On peut en effet imaginer de nouveaux objets dans des domaines tels que la médecine ou les matériaux. Et puis, comme c'est souvent le cas, il y a aussi des dérives. Selon moi, nous avons un peu tendance à promettre trop de choses et à tout amalgamer : il faut garder les pieds sur terre et ne pas englober dans les nanotechnologies et nanosciences toute la chimie ou toute la science des matériaux.. Car les nanos ne sont intéressantes que pour manipuler de la matière au niveau des atomes pour fabriquer un nouvel objet.

Drôles de molécules...

Dans notre laboratoire, nous avons fait quelques réalisations concrètes. Notamment des molécules que j'appelle « technomimétiques » car elles rappellent des objets techniques de la vie courante. Par exemple, des molécules qui ressemblent à un engrenage, d'autres qui font penser à une brouette, ou encore qui ont la forme des premiers robots envoyés sur Mars. On pouvait déposer ces dernières sur des surfaces sur lesquelles elles se déplaçaient au hasard. Nous les avons appelées des landers pour cette raison : elles « explorent » un terrain. A l'échelle atomique en effet, la surface sur laquelle nous les posons n'est pas complètement plate, comportant ici ou là des reliefs dus à des couches d'atomes supplémentaires.

L'ASPIRATEUR A ATOMES



Ramassage des atomes de cuivre "en trop" sur une surface de cuivre

© CNRS-CEMIST - ICM - ITM - Université de Bordeaux

Nous sommes donc capables de bloquer nos molécules landers contre des « marches » atomiques, comme nous garons une voiture dans un parking. La forme de ces molécules a été pensée pour venir se bloquer contre ces marches atomiques. Et nous nous sommes rendus compte, avec l'expérience, que la forme d'une molécule n'est pas rigide : elle se déforme au voisinage de ces marches comme si elle s'y coulait un peu. Cela signifie que la molécule s'adapte à la surface beaucoup plus qu'on ne le pensait. C'est amusant, mais cela représente aussi un inconvénient. Car lorsqu'on fabrique des choses assez sophistiquées avec des molécules qui sont des petites merveilles d'horlogeries, avec des fonctions extrêmement précises, et que ces « objets » sont en fait mous, coulant comme un camembert, c'est embêtant. Elles ne se comportent pas du tout comme on le croyait. Voilà qui nous rappelle que nous devons rester humbles et qu'il nous reste encore beaucoup de travail.

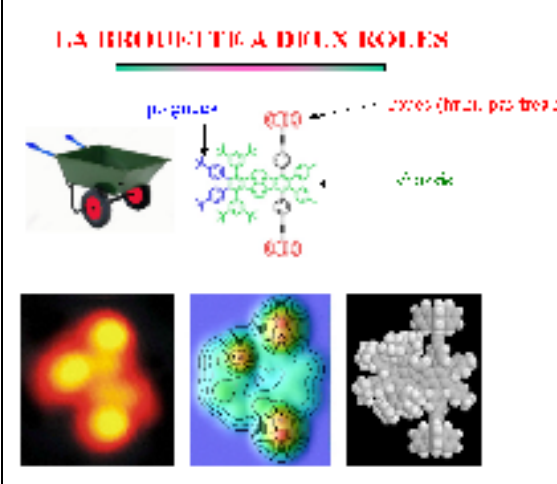
Brouettes, fils d'araignée et aspirateur !

Nous avons également fabriqué un outil dans notre laboratoire après de nombreuses simulations sur ordinateur et beaucoup de travail de micro-mécanique. Cela répond à ce qu'avait dit Feynman : il nous faut des outils de plus en plus petits qui, eux-mêmes, vont fabriquer des objets de plus en plus petits. Nous avons appelé le nôtre le « nanostencil » (le stencil était un système de polycopie, à l'aide d'un papier paraffiné, se comportant comme un pochoir et qui permettait de projeter de l'encre fluide). Dans notre cas, nous projetons des flux d'atomes à travers deux fentes ultra-fines. Cela permet de déposer des atomes qui dessinent deux électrodes. Nous pouvons ensuite déposer entre eux une molécule et envisager de fabriquer un circuit électronique...

Autre exemple : le nanofil d'araignée, ainsi baptisé parce que lorsqu'on pousse cette molécule (en jaune sur l'image), elle laisse derrière elle une sorte de fil d'araignée constitué par les atomes qu'elle a tendance à capter à sa proximité.

Et puis, nous avons créé des mini-machines mécaniques, tel que l'aspirateur à atomes : avec une molécule assez classique à faire, que nous déposons sur une surface où des atomes de cuivre dépassent – ils sont en « trop » sur la surface -, nous parvenons à rassembler ces atomes, à en faire un petit « tas », en poussant la molécule avec le microscope à effet tunnel. C'est l'équivalent de l'aspirateur qui ramasse la poussière....

LA BROUETTE A DEUX ROUES



En poussant avec la pointe, les roues vont-elles tourner ?

Même chose avec la « brouette » ou encore les nanovoitures, qui désignent des molécules ayant la forme d'un châssis avec quatre groupes volumineux.

La manipulation a été réalisée cette fois dans une université du Texas. Et ces chercheurs se sont aperçus qu'effectivement, lorsqu'on poussait ce type de molécule à l'aide de la pointe du microscope à effet tunnel dans le bon sens, les « roues » tournent au lieu de déraiser. Nous avons le même type de problèmes sur un « nanomoteur » que nous avons mis au point.

Tout cela est, à chaque fois, le résultat d'un travail d'équipe. D'un ensemble de gens de toutes les nationalités, et de plusieurs

disciplines. Certains se consacrent à la chimie, d'autres à la physique. Les uns font plutôt de la théorie, les autres privilégient les expérimentations... Et le but est que tous fonctionnent ensemble. Bien sûr, nous rencontrons quelques difficultés. Au stade actuel des nanosciences et des nanotechnologies, il faut être honnête : nous n'avons pas encore tout à fait inventé la roue. Et à peine a-t-on commencé à approcher de la solution, que les pouvoirs publics nous demandent : alors, allez-vous créer des emplois avec cela ? Allez-vous résoudre de grands problèmes de société?... Il y a comme une impatience. Tout le monde aimerait bien que la roue tourne rapidement alors qu'elle est encore en construction ».

LES NAVOITURES

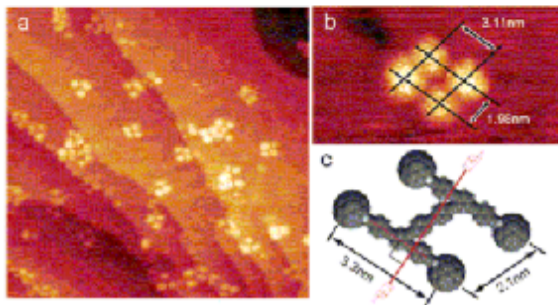
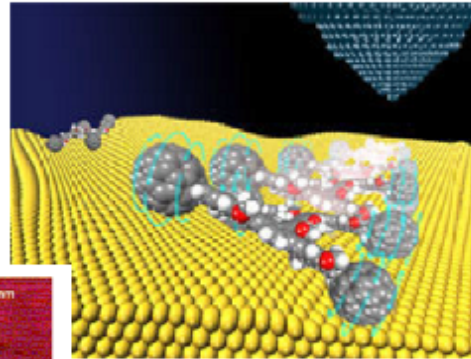
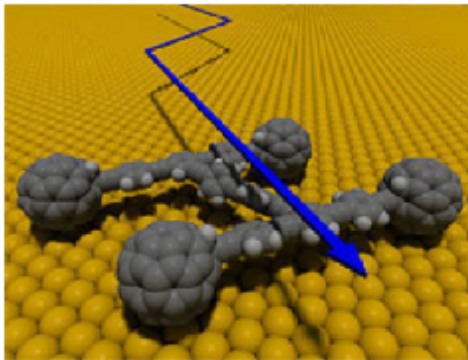


Image from Rice University
Houston, TX, USA

1- Points de repères pour mesurer l'infiniment petit*

1 millimètre est égal à : 1000 microns (μm)
1 million de nanomètres
10 millions d'angströms

1 nanomètre est égal à 10 angströms

L'épaisseur d'un cheveu est d'environ 100 microns et la taille d'un atome est de 2 à 3 angströms...

En clair, le rapport de taille qui existe entre un atome et une noix est ainsi le même que celui qui existe entre une balle de tennis ... et la Terre !

* *source : laboratoire de physique des matériaux, Cnrs, Université de Nancy.*

2- La découverte de l'atome

L'atome vient du grec *atomos*, qui signifie « qu'on ne peut pas diviser, couper ». Dès l'Antiquité, le grec Démocrite pensait que la matière était constituée de corpuscules en mouvement, invisibles car trop petits, indivisibles, d'une infinité de formes et indestructibles. Ce n'est qu'au 19^{ème} siècle que Thompson découvre l'électron, le premier composant de l'atome. En 1912, Rutherford découvre le noyau atomique, composé de nucléons (les protons et les neutrons), autour duquel tournent les électrons.

Mais c'est la théorie quantique posée par Max Planck et reprise par A. Einstein qui, le mieux, rendra compte de la structure et des mécanismes des atomes.

3- **La physique quantique** s'intéresse aux phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique. Le mot est tiré des *quanta*, pluriel latin de *quantum* signifiant « quantité ». Ce terme des quanta a été utilisé pour la première fois par le physicien allemand Max Planck en 1900, pour désigner les paquets discontinus par lesquels se font les échanges d'énergie entre la lumière et la matière.

4- **Le transistor**, inventé en 1948 par des chercheurs américains des laboratoires Bell, a permis d'ouvrir la voie à la miniaturisation, remplaçant les tubes de lampes. Tiré d'un mot anglais, *transfer resistor*, il signifie littéralement « résistance de transfert ». Ce composant électronique peut amplifier des courants électriques, stabiliser une tension, moduler un signal. Il est utilisé principalement comme interrupteur. Un transistor comporte trois à quatre électrodes. Plus robuste qu'un tube électronique, il a rapidement remplacé ce dernier. Il en existe principalement deux sortes : les transistors bipolaires, qui sont des amplificateurs de courant ; et les transistors à effet de champ, destinés plutôt à réguler la tension.

—Le point de vue du prospectiviste
Thierry Gaudin¹, polytechnicien
et Ingénieur Général des Mines.

Quand le temps aussi se compte en nanosecondes...

« La prospective est une activité qui utilise un peu toutes les disciplines : des éléments de science, mais aussi de philosophie, d'économie ou de sociologie. Elle porte sur l'étude des avènements possibles et réunit la prospection qui est l'exploration de domaines nouveaux, et la perspective qui induit les notions de point de vue et de futur.

Lorsqu'on étudie l'histoire de techniques et des technologies, on se rend compte qu'une succession d'inventions peut aussi générer des changements de civilisation. Longtemps ces changements ont principalement porté principalement sur l'énergie et les matériaux. C'est le cas de la révolution industrielle. Mais désormais, nous sommes dans une ère où l'essentiel est plutôt du côté des transformations du temps et du vivant.

Rendez-vous compte ainsi de l'extraordinaire contraction du temps que représente la microélectronique, faite d'événements programmés qui se déroulent aujourd'hui en nanosecondes (un milliardième de seconde) et demain en femtosecondes (millionième de nanosecondes). Nécessairement, cette perception du temps sans cesse plus fine modifie notre organisation.

Par ailleurs, on s'est récemment rendu compte qu'il y avait une convergence entre les biotechnologies et les nanotechnologies. Car à cette échelle, les questions qui se posent pour les molécules vivantes ressemblent beaucoup à celles que connaissent les chercheurs travaillant sur les molécules non vivantes. Cela pose des problèmes éthiques nouveaux et non négligeables.

Prenez l'exemple de l'ordinateur qui réagit avec un délai inférieur au dixième de seconde. Face à lui, quel est le temps

neuronal ? Quand vous croisez par hasard quelqu'un que vous connaissez bien dans la rue, il vous faut 120 millisecondes pour le reconnaître. Dès lors que vous avez des machines qui réagissent plus vite que ces 120 millisecondes, vous pouvez espérer piloter le système neuronal de celui qui utilise la machine.

Cela permet le développement d'industries « hallucinogènes », utilisant la vitesse des machines pour influencer, voire piloter le psychisme des usagers. Il est clair qu'un certain nombre de jeux vidéos sont programmés par des gens qui savent parfaitement au bout de combien de millisecondes il faut un événement pour relancer l'attention du joueur. Ces événements ont un effet hypnotique.

D'autres machines utilisent cet effet. La télévision, par exemple. Désormais, le journal télévisé est constitué de successions de séquences qui durent trois à quatre secondes. Pourquoi ? Parce que si l'on reste sur un plan fixe pendant plus de trois à quatre secondes, l'attention se disperse. Cela influe sur notre comportement neuronal. A tel point que désormais, de nous-mêmes, nous « zappons » si notre attention n'est pas ressollicitée. Dans ce cas, nous n'arrivons pas à nous fixer sur quelque chose de continu. Ce n'est pas anecdotique car subrepticement, les machines agissent sur notre mental. Si nous n'y faisons pas attention, nous nous faisons prendre par ce piège et nous avons des difficultés à nous concentrer, voire à nous identifier. »

1- Après avoir été responsable, au Ministère français de l'industrie, de la construction d'une politique d'innovation, Thierry Gaudin a fondé en 1993 « Prospective 2100 ». Il dirige aujourd'hui cette association internationale dont l'objectif est de préparer des programmes planétaires pour le 21^{ème} siècle..

—— Questions et réponses
Science ou fiction ?

Jusqu'où peut-on aller dans cette course à l'infiniment petit, qu'est-il possible d'imaginer à l'avenir tant du côté des objets qui peuvent améliorer notre vie, que de mini-objets néfastes, et difficiles à contrôler ? Bon nombre des questions des lycéens concernaient cette hypothèse : et si la fiction était dépassée par la science ?

Question : Vous devez quand même bien avoir en tête quelques idées de l'utilisation possible de cette roue...

Jean-Pierre Launay : Les applications les plus immédiates concernent la micro-électronique qui cherche constamment à diminuer la taille des circuits électroniques. L'idée la plus simple consisterait alors à faire un fil d'atomes, qui servirait par exemple à se connecter à une molécule complexe jouant le rôle de composant électronique. Concernant la mécanique, on peut envisager que certaines « machines » fonctionnent sans aucune électronique. C'est plus futuriste. Certains ont ainsi imaginé des sortes de petits robots, notamment pour le secteur biomédical, où il existe une attente forte de la population pour augmenter l'efficacité des médicaments et des vaccins. Des chercheurs travaillent ainsi sur un robot ultra-miniaturisé et autonome qui serait capable de se déplacer dans les artères, d'identifier les dépôts de cholestérol et de les « grignoter ». Cela dit, soyons clair : ce genre de choses ne se fera pas avant 10 ou 15 ans.

Votre laboratoire est à la pointe de la technologie. Avez-vous une idée des recherches menées à l'étranger dans ce domaine ?

Jean-Pierre Launay : La planète entière est une grande famille au niveau scientifique. Nous sommes en contact permanent avec des collègues, amis et concurrents étrangers. Nous savons donc effectivement ce qui se passe ailleurs. Dans notre domaine, il y a beaucoup de recherche aux Etats-Unis, au Japon et en Chine. Cette dernière est en train d'« exploser » au niveau de la recherche scientifique. Et puis, autre grand pôle de recherche actuelle des nanos : l'Europe. Et c'est à cette échelle, et non au niveau national, que nous travaillons. Nous nous répartissons les expériences et les programmes de recherche. Nous pouvons très bien fabriquer une molécule à Toulouse, l'envoyer au Danemark qui va y travailler avec un microscope à effet tunnel, tandis que la partie théorique est étudiée à Berlin. Dans certains cas, nous sommes distancés par les Américains, les Japonais ou les Chinois. Dans d'autres, au contraire, nous sommes les premiers. Nous nous situons dans le peloton de tête mondial mais il faut en permanence échanger et surveiller ce que font les concurrents.

Avec les nanotechnologies, peut-on modifier ou créer de nouveaux matériaux ?

Jean-Pierre Launay : En principe, on peut créer plein de choses. Seulement cela prend énormément de temps. Nous pouvons en théorie envisager de créer un matériau révolutionnaire comportant des atomes différents positionnés un par un, pour avoir une structure parfaitement adaptée à nos besoins. Mais vu le temps nécessaire pour le réaliser, et donc l'argent, il faudrait vraiment que l'enjeu soit de taille. Pour créer de nouveaux matériaux, la meilleure technique reste quand même la chimie classique qui permet de produire en grandes quantités.

Comment espérez-vous faire fonctionner la roue du nanomoteur ?

Jean-Pierre Launay : Nous avons imaginé que ce moteur pourrait peut-être bouger parce que nous ferons « avaler » des électrons à sa partie mobile. Vous le savez sans doute, en électricité, les charges de même signe se repoussent et les charges de signes opposés s'attirent (positif, négatif). Une fois que cette partie mobile sera chargée, sachant qu'il y a deux électrodes de signes opposés à proximité, et que l'on chargera également la partie supérieure du moteur, celle-ci sera repoussée par l'électrode de même signe et attirée par l'électrode de signe opposé. Le raisonnement est aussi naïf. Pour l'instant, l'essai n'a pas été réalisé... L'idée est de le mettre en route par une alimentation électrique.

Vous travaillez sur les molécules et les atomes mais pensez-vous un jour parvenir à travailler aussi sur les quarks ?

Jean-Pierre Launay : C'est une excellente question à laquelle je n'ai pas de réponse. Un quark est le constituant d'une particule élémentaire comme les protons et les neutrons, qui sont eux-mêmes les constituants du noyau de l'atome. Je dois dire à ma grande honte que je n'en sais pas plus. Mais en tant chimiste et physicien de la matière, je n'ai jamais travaillé sur les quarks ; je n'ai aucun outillage pour le faire. C'est encore un autre monde sur lequel il faudra nous pencher. Nous ne savons pas encore représenter ce qu'il y a au-delà de l'atome, à l'intérieur du noyau. Il y a déjà tellement de choses à faire avec des molécules et avec des atomes !

Y a-t-il des travaux qui portent sur la matière vivante ? Cela me fait un peu peur si c'est le cas. On peut craindre que les scientifiques se prennent pour Dieu, qu'ils cherchent à modifier un peu tout.

Jean-Pierre Launay : Vous savez qu'il y a actuellement un débat sur le clonage et ses usages possibles, comme le clonage thérapeutique, mais aussi d'autres objectifs moins louables. La science est capable du meilleur comme du pire. A partir du moment où l'on saura faire un petit robot capable de soigner les gens, on sera aussi capable de faire un petit robot qui pourra faire des choses pas jolies du tout. C'est propre au progrès scientifique : on ne peut pas préjuger de l'utilisation de l'avancée des connaissances. Cela signifie qu'il faut être vigilant et mettre en place des réglementations pour interdire certains usages jugés dangereux ou négatif d'un point de vue moral. Le travail du scientifique est de donner des outils nouveaux à la société. Un débat et un contrôle des applications doivent donc ensuite être opérés, à travers des commissions d'éthique et des lois.

Quand il y a de nouvelles technologies, il y a de nouveaux risques.

Aujourd'hui certains disent qu'avec le développement des nanomatériaux, il pourrait y avoir le développement de particules intelligentes qui seraient des espèces d'agents qui nous surveilleraient...

On parle également de « poussières » issues de la fabrication d'objets nanos, qui pollueraient notre environnement et nuiraient à notre santé. Qu'en pensez-vous ?

Jean-Pierre Launay : Le risque le plus simple à comprendre est effectivement celui de ces petites poussières.

Il y a un précédent : l'amiante. On s'est servi de l'amiante pendant des dizaines d'années et puis on a appris que les poussières d'amiante sont cancérigènes. Les gens qui travaillent sur les nanotechnologies, en particulier sur les nanotubes de carbone, y ont pensé.

Il y a une surveillance, des tests pour déterminer si ces poussières sont dangereuses ou pas, des systèmes de protections pour ne pas répandre ces poussières, et le port du masque pour ceux qui manipulent les nanotubes.

Nous prenons le problème plus en amont qu'on ne l'a fait dans le passé pour l'amiante. Ce problème n'est pas différent de celui de la manipulation de produits chimiques.

Concernant des choses plus futuristes, Michael Crichton a écrit un roman qui porte sur des nanoparticules intelligentes, des sortes de nanorobots qui espionnent les gens. A long terme, on peut imaginer des choses assez horribles de ce type. Mais en l'absence de maintenance, la grande majorité des objets complexes que l'on fabrique tombe en panne un jour ou l'autre, et cesse donc de fonctionner.

En fait, ce qui peut être réellement dangereux, c'est si l'on parvient à fabriquer un objet capable de se reproduire. On rejoindrait les problèmes posés par les virus ou les bactéries... Tant que l'on n'y réussit pas, il n'y a pas trop d'inquiétude à se faire. Mais il faut toujours être vigilants ».

Sur Internet

<http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/docs/plaq.nanomonde.pdf>

Une plaquette très lisible sur la micro et la nanotechnologie à télécharger gratuitement, réalisée par le ministère de la recherche.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Nanotechnologie>

Sur le site de l'encyclopédie Wikipédia, le dossier sur les nanotechnologies, présenté avec sérieux et prudence. Cette encyclopédie est d'ailleurs une mine d'informations, que la Mission Agrobiosciences recommande en général.

<http://www.europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/i23024.htm>

Le site de l'Union Européenne propose une synthèse très bien réalisée de ce que sont les nanotechnologies et les nanosciences, présente les activités qu'elle mène pour encourager ces avancées et les mesures à prendre.

<http://www.radiofrance.fr/rf/documentation/dossiers/liens/?rid=115000135&arch=1&imp=1>

Un dossier de Radio France pour faire le point sur les polémiques qui entourent les nanosciences et nanotechnologies, leur impact sociétal et les risques possibles.

Les livres

Les nanotechnologies doivent-elles nous faire peur ? De Louis Laurent et Jean-Claude Petit, éd. Le Pommier. 2005. Qu'appelle-t-on nanotechnologies, quels sont leurs enjeux, quels risques leur sont associés, quelles sont les attentes de la société ? Le point pour tous publics.

Les nanotechnologies – Espoir, menace ou mirage ? De Yan de Kerorguen. Ed. Lignes de Repères. 2006.

Un livre également accessible, qui souhaite poser toutes les questions du marché titanesque de monde minuscule, et présenter les entreprises pionnières, le « nanorama » de la recherche française et la vie quotidienne au temps des nanos.

DVD

Le relief de l'invisible, film documentaire de Pierre Oscar Lévy, Gabriel Turkieh et Jean-Michel Sanchez, Idéale Audience International.

Une plongée vertigineuse au cœur de la matière, avec des zooms de l'échelle macroscopique à celles des atomes. Disponible par « Les films du paradoxe », 16 rue des Orfèvres, 31 700 Blagnac, tél : 05 61 16 06 51.