

# Introduction aux nanotechnologies

Ing. A. HAVENNE  
Ir R. LESCROART,  
PIERRARD-Virton

*Cet article, introduction au « nanomonde », décrit d'abord quelques éléments historiques, puis le fonctionnement du microscope à force atomique qui est l'appareil d'observation des nanostructures. Ensuite, les voies ascendantes et descendantes d'assemblage sont expliquées en détail. Enfin, quelques applications sont présentées, certaines déjà développées dans nos laboratoires, d'autres, encore du domaine du rêve.*

*Mots-clefs : nanotechnologies, force atomique, lithographie, auto-assemblage*

*This article, introduction to the « nanoworld », describes at first some historical elements and then the functioning of the atomic force microscope which is the device to observe the nanostructures. Next, the up and down assembling lines are explained. Finally, some practice is introduced, some are already developed in our laboratories, the others are still belonging to the dream.*

*Keywords : nanotechnologies, atomic force, lithography, selfassembling.*

## 1. Introduction

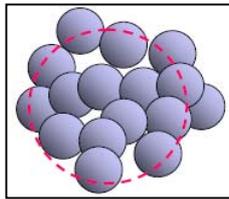
Richard Feynman, prix Nobel de Physique en 1965, a été le premier scientifique à avancer l'idée qu'il serait un jour possible de manipuler la matière à l'échelle de l'atome. C'est durant son intervention, intitulée « There is plenty of room at the bottom », devant l'American Physical Society en décembre 1959, qu'il envisage la possibilité de faire tenir tout le contenu des 24 volumes de l'encyclopédie Britannica sur une tête d'épingle. Toutefois, le terme nanotechnologie fut utilisé pour la première fois en 1974 par Norio Taniguchi et fut popularisé par K. Éric Drexler dans les années 1980, lorsque celui-ci introduisit le terme de « fabrication moléculaire ».

Les nanotechnologies sont définies comme étant la création et l'utilisation de matériaux, d'instruments et de systèmes portant sur des dimensions de l'ordre de 1 à 100 nanomètres (National Science and Technology Council). Un nanomètre est égal à un milliardième de mètre ( $10^{-9}$ m). En comparaison, un nanomètre est environ 100.000 plus fin qu'un cheveu humain et un atome a un diamètre de l'ordre d'un dixième de nanomètre.

Si un nouveau terme, nanotechnologies, a été défini pour mentionner ces objets de petite taille, ce n'est pas seulement parce qu'elles représentent l'étape ultime de la miniaturisation, mais également parce qu'à l'échelle nanométrique, le comportement de la matière donne lieu à de nouvelles propriétés physiques, chimiques, voire biologiques (Wautelet et coll., 2003). De fait, c'est à partir de 100 nanomètres que de nouveaux effets, jusque-là complètement inconnus, peuvent se révéler. Les nanotechnologies représentent donc un domaine pluridisciplinaire où les physiciens, les chimistes, les biologistes, mais aussi, les mécaniciens, les informaticiens, les médecins, etc. sont amenés à coopérer pour comprendre et utiliser au mieux les nouveaux phénomènes observés à cette échelle. Voici quelques particularités présentes dans le nanomonde qui remettent en question notre façon classique de voir les choses :

- Le nombre d'atomes présents à la surface d'une nanoparticule n'est pas négligeable par rapport au nombre d'atomes à l'intérieur de la particule. Cela entraîne, entre autres, une variation de la température de fusion en fonction de la taille de la nanoparticule (Wautelet et Guisbiers, 2003)

- La taille des blocs constituant l'entité (fig.1 : en bleu) est comparable à celle de l'entité elle-même (en pointillés rouges). Il n'existe donc plus de surface lisse. De plus, les fluctuations thermiques affectent directement la forme de l'entité.



*Figure 1 : Illustration de la propriété ci-dessus*

- Enfin, des effets quantiques apparaissent.

En conclusion, il est indéniable que ces nouveaux effets offrent de nouvelles opportunités, et ceux-ci lancent de nouveaux défis. Aussi les nanotechnologies intéressent-elles tous les secteurs d'activité, dont l'industrie. Celle-ci pourrait tirer profit des avantages que fournira cette miniaturisation, en terme de nouvelles applications, de rapidité de processus, de diminution des déchets et de matériaux utilisés, etc. et par conséquent, de diminution du coût de fabrication.

## **2. Microscope à force atomique**

Pour comprendre ces nouvelles propriétés de la matière et fabriquer des nanocomposants de manière fiable, il est nécessaire de pouvoir observer le nanomonde. L'appareil qui permet cette fascinante exploration parmi les atomes, c'est le microscope à effet tunnel, inventé par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer en 1981. Ensuite est apparu le microscope à force atomique (« AFM : Atomic Force Microscopy », en anglais). Celui-ci est généralement préféré à son prédécesseur, notamment parce qu'il offre la possibilité d'observer des surfaces non conductrices. Cela est particulièrement intéressant pour l'analyse des polymères et des matériaux biologiques (ADN).

## 2.1. Principe de fonctionnement

Le microscope à force atomique peut être utilisé dans l'air, dans le vide et même dans un liquide. Il va de soi que ces différents environnements ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients (Hartmann, 1997). Il faut également préciser que plusieurs modes de fonctionnement existent. Les paragraphes qui suivent expliquent principalement deux modes. Le premier est le mode "contact à déflexion constante" et le deuxième est le mode "contact intermittent" (Koutsos, 2006).

Si on vous demandait de dessiner la forme d'une surface que vous ne pouvez voir, vous l'effleureriez sans doute de vos doigts afin d'en connaître la topographie. Dans le mode contact à déflexion constante, c'est une pointe (fig. 2), dont le sommet est assimilé à un atome, qui est mise en contact avec la surface de l'échantillon à analyser et qui se déplace sur celui-ci (fig. 3). Cette pointe est placée au bout d'un microlevier (fig. 2), lui-même est relié à des éléments piézoélectriques qui en contrôlent les déplacements.



Figure 2 : Microleviers utilisés dans l'AFM

La force répulsive  $F$ , entre la surface et la pointe, provoque la déflexion du microlevier suivant la loi de Hooke :  $F = kz$ , où  $k$  est la constante de raideur du microlevier et  $z$  le déplacement vertical de celui-ci.

La valeur de  $z$  est mesurée à l'aide d'un faisceau laser dirigé vers l'extrémité dorsale du microlevier (fig. 3). Celle-ci étant réfléchissante, le faisceau laser est renvoyé vers un détecteur composé de deux photodiodes. La différence de potentiel entre ces deux photodiodes fournit la valeur de la déflexion verticale du microlevier, c'est-à-dire la valeur de  $z$ .

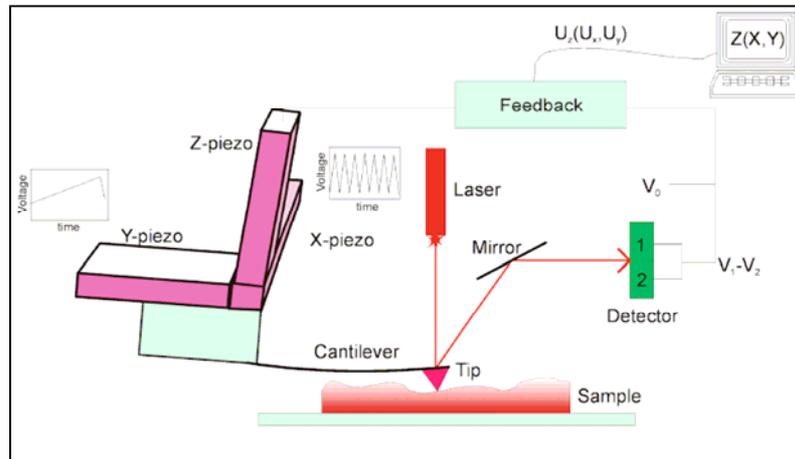


Figure 3 : Schématisation du principe de fonctionnement de l'AFM.

L'exploration de la surface est réalisée par les éléments piézoélectriques d'axe  $x$  et  $y$ . Durant cette analyse, l'élément piézoélectrique  $z$  est connecté à un système de rétroaction. Celui-ci est utilisé pour garder la différence de potentiel constante à la valeur de consigne  $V_0$ . En d'autres mots, la hauteur du microlevier (par rapport à l'échantillon) est constamment ajustée pour garder une déflexion constante, d'où le nom de ce mode. Dès lors, le signal de rétroaction  $U_z$  (tension appliquée à l'élément piézoélectrique  $z$ ) enregistré en fonction des coordonnées  $(x, y)$ , elles-mêmes données par  $U_x$  et  $U_y$  (tensions appliquées aux éléments piézoélectriques  $x$  et  $y$ ), donne une représentation topographique de la surface étudiée.

Ce mode de fonctionnement étant "de contact pur", il présente cependant un inconvénient majeur : il peut être destructif lors de l'étude de surfaces fragiles. Il a, par exemple, été constaté que la largeur de l'ADN varie en fonction de la force de consigne  $F_0$ .

Le mode contact intermittent (« tapping mode », en anglais) a résolu ce problème. Le principe est de mettre le microlevier en vibration à sa fréquence de résonance (ou proche de celle-ci) à l'aide d'un actionneur piézoélectrique. Le microlevier est ensuite descendu de façon à ce que la pointe soit en contacts intermittents avec l'échantillon à analyser (d'où le nom de ce mode). Cette mise en contact permet d'atteindre une haute résolution tandis

que le retrait de la pointe évite de traîner celle-ci sur la surface et d'endommager les échantillons fragiles. Comme dans le mode précédent, un système de rétroaction opère sur la hauteur du microlevier, mais cette fois, c'est l'amplitude d'oscillation qui est maintenue constante. La réduction de l'amplitude d'oscillation est assimilée à la rencontre d'un obstacle. Inversement, l'augmentation de l'amplitude d'oscillation correspond à un creux.

Un autre avantage de ce mode de fonctionnement est qu'il est possible de lui associer la mesure des sauts de phase dans le signal oscillatoire du microlevier. Les données enregistrées fournissent des informations sur la structure de la surface, telles que la composition, la friction, l'adhésion, la viscoélasticité, etc. La figure 4 montre un échantillon composé de deux matières différentes, A et B, ainsi que les graphes de la topographie et des sauts de phase observés.

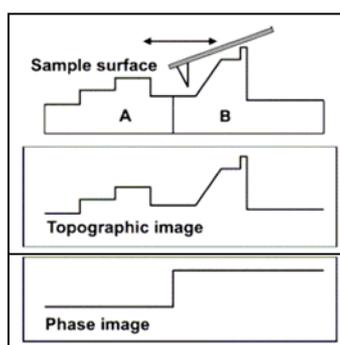


Figure 4 : Schématisation des signaux obtenus lors d'un échantillonnage.

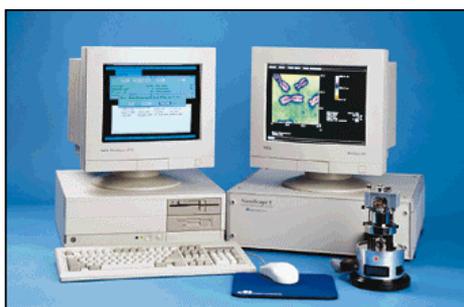


Figure 6 : Mise en évidence de la taille de l'AFM Nanoscope III.

Le microscope à force atomique Nanoscope III est représenté sur les figures 5 et 6. Force est de constater que cet équipement est loin d'être encombrant !

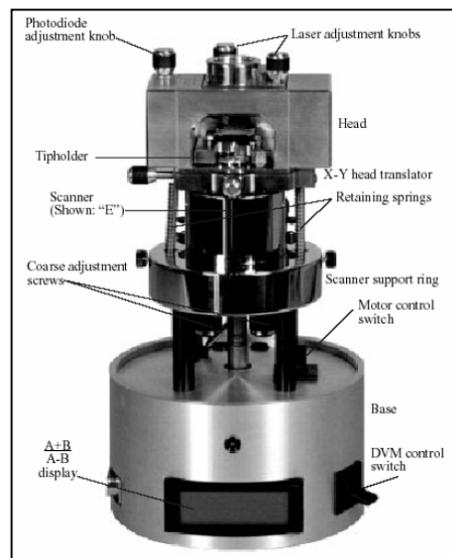


Figure 5 : AFM Nanoscope III.

### 3. Techniques de fabrication : Top-down vs Bottom-up

Presque tous les produits fabriqués actuellement auraient des propriétés bien meilleures si leur structure pouvait être contrôlée à l'échelle moléculaire. Or il existe une large gamme de techniques capables de créer de telles nanostructures, et ce avec des degrés variables de qualité, vitesse et coût. On distingue deux voies pour fabriquer des nanocomposants : la voie descendante (top-down) et la voie ascendante (bottom-up).

La voie descendante consiste à miniaturiser les structures jusqu'à l'échelle nanométrique par retrait de la matière. La microélectronique en est un bon exemple puisqu'elle utilise cette voie depuis une trentaine d'années pour la création des circuits intégrés. La technique proprement dite porte le nom de « lithographie ».

La voie ascendante comprend l'assemblage (positional assembly) ou l'auto-assemblage (self-assembly) de constituants atomiques ou moléculaires afin de constituer des objets nanométriques (fabrication moléculaire).

### 3.1. La voie descendante : la lithographie.

Il existe plusieurs types de lithographie permettant de réaliser des circuits imprimés à des résolutions variables. La plus utilisée est la photolithographie optique. Elle ne permet pas de réaliser les plus petites structures mais elle est rapide. Car, même si les lithographies à faisceau d'électrons et à faisceau d'ions offrent des résolutions pouvant atteindre 10 nm, l'équipement est coûteux et la procédure trop lente pour être utilisée en production de masse (Cheung, 2006).

En combinant les différentes opérations que ces techniques lithographiques autorisent, il est possible de réaliser pratiquement n'importe quel circuit intégré. La figure 7 présente, par exemple, deux transistors réalisés par la photolithographie optique. Un circuit imprimé se compose généralement de 20 à 30 couches ; le nombre d'opérations nécessaires pour les réaliser est donc assez important.



Figure 7 : Illustration de deux transistors réalisés par lithographie optique

Quoiqu'il en soit, la lithographie est aujourd'hui proche de ses limites de résolution. De nouvelles techniques doivent donc être mises au point.

### 3.2. La voie ascendante : l'assemblage.

Une des méthodes donnant accès à la miniaturisation ultime est l'assemblage. C'est la technique dans laquelle les atomes et molécules sont

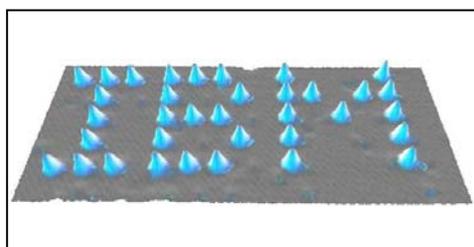
placés délibérément un par un.

Les cristaux semi-conducteurs utilisés aujourd'hui pour fabriquer les microprocesseurs (circuits intégrés) sont des cristaux de silicium. Cependant, le silicium n'a pas été choisi parce qu'il fournit les meilleures performances mais parce que les techniques de fabrication sont connues et maîtrisées. Si les microprocesseurs étaient fabriqués de cristaux de diamant, il serait possible de fabriquer des ordinateurs coûtant moins d'un euro par unité, fonctionnant à des fréquences de dizaines de gigahertz, garantissant une meilleure fiabilité, etc.

Pour atteindre la qualité de diamant nécessaire à la réalisation de tels composants, le cristal doit non seulement être extrêmement pur, mais également avoir une structure d'impuretés précise et complexe. Pour ce faire, la fabrication moléculaire (l'assemblage) sera nécessaire. Pour être plus précis, il faudra, non seulement, enlever des atomes d'hydrogène de la surface du diamant, mais aussi y placer des atomes de carbone, tout cela à des endroits déterminés. La fabrication moléculaire consiste donc à sélectionner le site de réaction en contrôlant la position et l'orientation des réactifs (Merkle, 1993).

Pour arriver à ce stade, on distingue quatre exigences :

- Un appareil devra permettre le positionnement à l'échelle de l'atome, c'est-à-dire avec une précision de 1 ou 2 angströms. Pour cela, on envisage d'utiliser un « bras robotique ». Ainsi, on a déjà utilisé la pointe située au bout du microlevier dans les microscopes à effet tunnel ou à force atomique, pour déplacer des atomes. La figure 8 en montre un résultat.
- Puisque des outils hautement réactifs seront manipulés (molécule réactive déposant ou captant un atome à un endroit voulu), il est indispensable de travailler dans un environnement inerte.
- La pièce en construction doit être relativement rigide, c'est-à-dire non sujette à des vibrations excédant l'angström (notamment les vibrations thermiques). Si ce n'est pas le cas, le positionnement est impossible.
- Enfin il faudra trouver une technique de production des outils réactifs.



*Figure 8 : 35 atomes de Xénon sur Nickel.  
Réalisé avec un microscope à effet tunnel*

Parmi ces exigences, certaines sont difficiles à satisfaire, notamment l'environnement inerte. C'est pourquoi une solution transitoire a été mise en œuvre. Celle-ci porte le nom de « brick based nanotechnology » ou « building block based nanotechnology ». Le principe est de fabriquer différents nanocomposants à partir de techniques plus simples (comme l'auto-assemblage : voir chapitre suivant) et ensuite, d'assembler ces différents nanocomposants en contrôlant leur position. Il va de soi que les performances mécaniques, thermiques, électriques, etc. seront à revoir à la baisse par rapport ceux de la fabrication moléculaire proprement dite. Cependant, cette technique transitoire est plus facile à mettre en œuvre, offre des propriétés très valables par rapport à la technologie actuelle et pourrait même permettre l'utilisation des systèmes fabriqués pour en faire de meilleurs.

En conclusion, même si la technique de l'assemblage doit encore évoluer, les progrès sont rapides et concrets. Des informations plus récentes sur ce sujet peuvent être lues à l'adresse Internet suivante :

<http://www.merkle.com/>.

### **3.3. La voie ascendante : auto-assemblage.**

Comme le nom l'indique bien, l'auto-assemblage est une technique où les atomes et/ou molécules s'assemblent automatiquement suivant des interactions spécifiques. Généralement, cet assemblage se fait en plongeant le substrat dans une solution ou dans une phase gazeuse jusqu'à obtenir une structure stable. Voici deux méthodes illustrant le principe de l'auto-assemblage (Huie, 2003).

L'auto-assemblage électrostatique consiste à tremper alternativement le substrat dans des solutions anionique et cationique (fig.9), sans oublier le rinçage et le séchage après chaque étape. L'avantage de cette technique est qu'elle permet l'auto-assemblage d'une large variété de matériaux puisque tout atome peut théoriquement être sous forme d'anion ou de cation. L'épaisseur de la couche d'ions déposée sur le substrat peut être contrôlée par le degré d'ionisation de la solution, c'est-à-dire son pH.

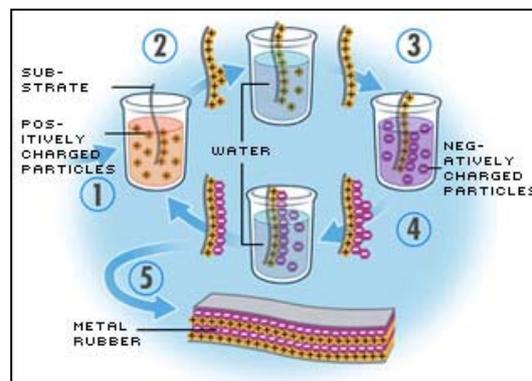


Figure 9 : Schématisation des différentes étapes de l'auto-assemblage électrostatique.

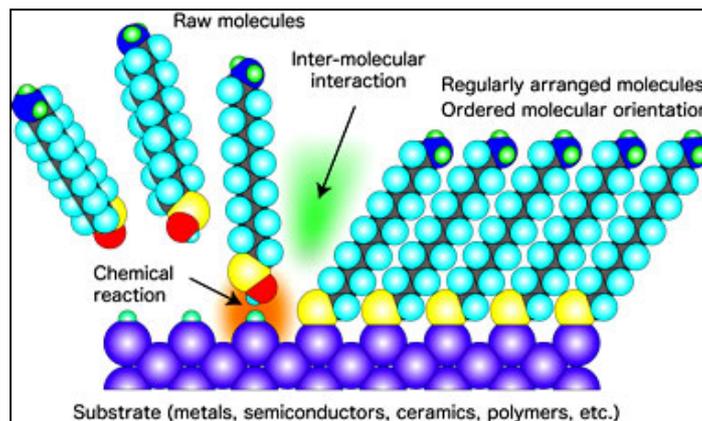


Figure 10 : Schématisation de l'organisation de molécules dans la technique de l'auto-assemblage chimique.

L'auto-assemblage chimique consiste également à plonger le substrat dans une solution contenant les atomes ou molécules qui doivent réagir avec lui. Cette technique englobe présente un ensemble de possibilités plus restreint mais est avantageuse par rapport à l'auto-assemblage électrostatique car l'orientation des différents réactifs y est « contrôlée » (fig.10).

### 3.4. Lithographie molle (soft lithography)

La lithographie molle comprend deux techniques principales : le « dip pen nanolithography » et le « microcontact printing ». Ces techniques sont considérées comme transitoires puisqu'elles comportent une partie d'auto-assemblage et une partie de positionnement. Celles-ci sont brièvement expliquées ci-dessous.

Dans le cas du « dip pen nanolithography », un microscope à force atomique « écrit » directement sur le substrat à l'aide de sa pointe, qui délivre les molécules par les mécanismes de capillarité et de réaction chimique (Piner et al., 1999).

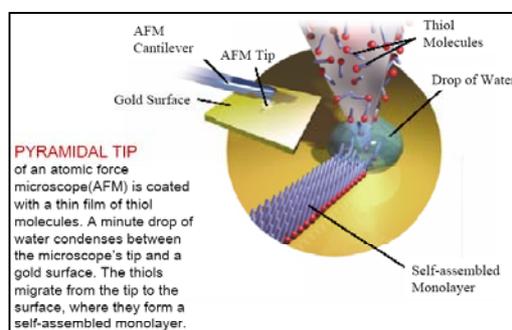
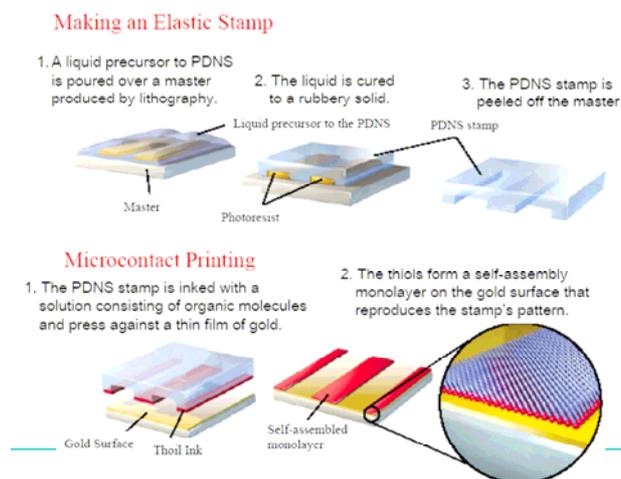


Figure 11 : Schématisation de la technique du « dip pen nanolithography ».

Dans le cas du « microcontact printing », un moule est fabriqué en silicium par lithographie à faisceau d'électrons. Un liquide de PDMS (polydiméthoxysilane) est ensuite coulé dans ce moule. Celui-ci, solidifié, va former un tampon pouvant être recouvert, par auto-assemblage, des molécules (exemple : des protéines ; Bernard et al., 2000) à placer sur le substrat. Il ne reste plus qu'à appliquer le tampon sur le substrat en question (Wilbur et al., 1996).



*Figure 12: Schématisation des différentes étapes du « microcontact printing ».*

### 3.5. Conclusions

De nombreuses techniques sont envisagées pour pouvoir contrôler la fabrication de composants à l'échelle de l'atome. Certaines sont déjà fort avancées, d'autres sont au stade de la recherche, mais les progrès sont bien présents. Ce n'est donc plus qu'une question de temps.

## 4. Applications

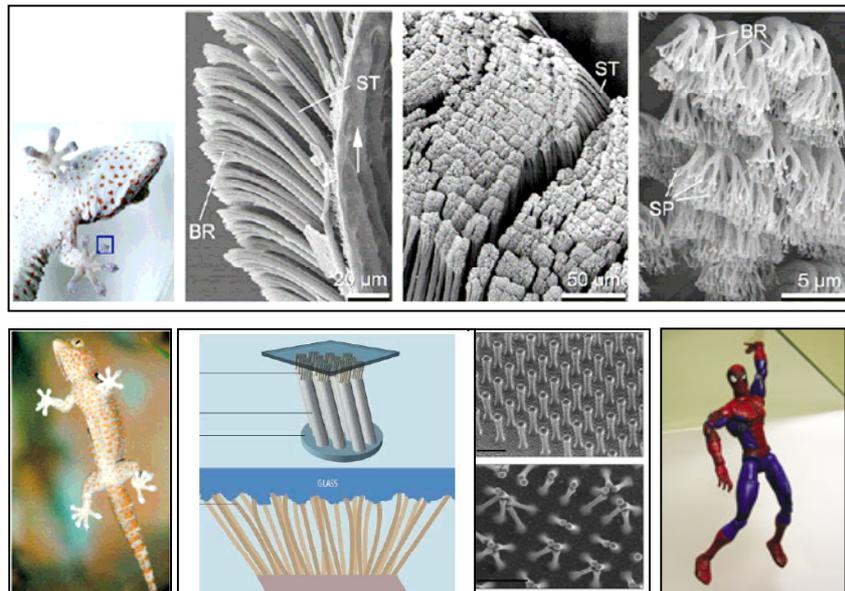
Plutôt que de citer les applications possibles sans aucune explication, quelques exemples plus détaillés ont été choisis pour illustrer l'impact que les nanotechnologies pourraient avoir dans les années à venir.

### 4.1. Gecko

Le gecko (Geim et al., 2003) est un animal qui intéresse particulièrement les scientifiques par ce que ce petit lézard peut courir sur du sable et ensuite monter sur une vitre verticale humide sans aucun problème. Voilà donc pourquoi les pattes de celui-ci ont été étudiées. L'observation montre qu'un

doigt de gecko se compose de centaines de milliers de setae (ST sur la figure 13), chaque seta contenant des centaines de spatulae (SP sur la figure 13). Le fin diamètre des spatulae (0,2 à 0,5  $\mu\text{m}$ ) augmente la surface de contact entre les pattes du gecko et la surface touchée, ce qui permet l'adhésion (figure 13). Ce qui est assez remarquable est qu'il a été constaté que le diamètre des spatulae tombe exactement dans la plage où les forces de van der Waals et de capillarité deviennent comparables, ce qui permet au gecko de monter tant sur des surfaces hydrophiles que sur des surfaces hydrophobes. Ce fait est probablement dû à l'évolution naturelle.

Quoiqu'il en soit, les chercheurs ont essayé de reproduire cette structure grâce à la lithographie à faisceau d'électrons (figure 13). Leurs expériences ont abouti à un « papier collant » de  $1\text{cm}^2$  capable de soutenir une masse de 1kg et ce après plusieurs collages et décollages. Des progrès restent à faire mais l'homme araignée n'est plus si loin de la réalité !



*Figure 13 : En haut : différentes illustrations de la patte du gecko. En bas, de gauche à droite : gecko ; principe d'adhésion ; tentative d'imitation de la patte du gecko ; homme araignée.*

## 4.2. Moteurs Moléculaires

Il existe dans notre corps des moteurs moléculaires naturels dont le fonctionnement est désormais assez bien compris. Mais il existe également des moteurs moléculaires synthétiques, comme par exemple la molécule représentée sur la figure 14. Des variations de température et des expositions à certaines longueurs d'onde, elle est capable de réaliser une rotation de 360°. Les scientifiques essaient maintenant d'y accrocher un « axe » ce qui donnera bien un moteur moléculaire auquel il conviendra alors d'adapter des « engrenages » (Biggs, 2006).

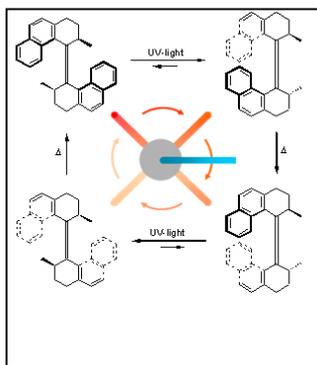


Figure 14 : Première génération de moteur moléculaire.

## 4.3. Livraison de médicaments

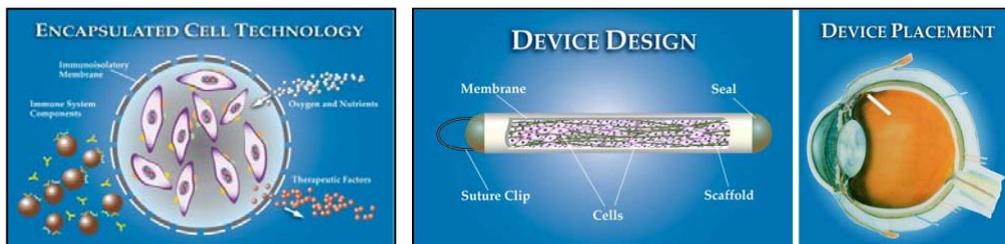
La médecine sera également fortement concernée par les avancées technologiques dans le nanomonde. Un exemple est la livraison de médicaments à des endroits spécifiques dans le corps.

### *Encapsulation du médicament*

L'objectif de l'encapsulation du médicament est de protéger celui-ci de notre corps et inversement.

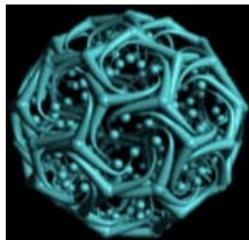
Un exemple de cette encapsulation est la technique mise au point par Neurotech pour soigner les maladies chroniques de la rétine. Des cellules génétiquement modifiées sont placées dans une capsule semi-perméable (figure 15). Celle-ci permet, d'une part, l'influx d'oxygène et de nutriments néces-

saires à la survie de ces cellules, et d'autre part, protège celles-ci de notre système immunitaire. Les cellules en question produisent les protéines thérapeutiques ralentissant significativement, ou arrêtant, les maladies de l'œil. La figure 15 montre l'endroit de l'œil où la capsule est introduite.



*Figure 15 : Illustrations de la capsule fabriquée par Neurotech pour soigner les maladies chroniques de la rétine.*

Cet exemple n'illustre pas forcément bien l'aspect nanotechnologique de l'encapsulation, puisque cette capsule fait 6mm de long. Cependant il faut savoir qu'il est possible de créer des nanocontainers qui constituent des imitations de la nature. Les molécules de clathrin (figure 16) sont un bon exemple de nanocontainers naturels. Une vidéo explicite est disponible à l'adresse suivante : <http://www.hms.harvard.edu/news/clathrin/>.



*Figure 16 : Nano container formé de molécules de clathrin.*

### **Porteurs de médicament**

Il est possible de relier ces nanocontainers à des molécules ayant des affinités particulières avec les cellules infectées. Le médicament est donc amené exactement où il est nécessaire, ce qui minimise la toxicité. Pour libérer ce-

lui-ci, il suffira, par exemple, d'exposer le nanocontainer à une longueur d'onde non absorbable par la peau mais bien par la nanoparticule. En effet, il faut savoir qu'un des nouveaux effets observés à l'échelle nanométrique est que les rayonnements absorbés ne dépendent plus uniquement du matériau mais également de la taille de la nanoparticule.

Nanospectra Biosciences (2006) a d'ailleurs envisagé d'utiliser des petites billes couvertes d'or qui iraient s'accrocher à des cellules cancérigènes. Celles-ci, exposées à une longueur d'onde adéquate, chaufferaient et détruiraient les cellules infectées (figure 17).

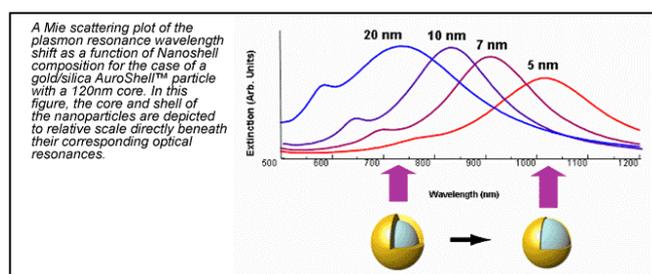


Figure 17 : Variation de la longueur d'onde absorbée par la particule en fonction de sa taille.

### Nanoémulsions

Réduire la taille des particules de médicament améliore les propriétés pharmaceutiques. Cette propriété intéresse d'ailleurs beaucoup les chimistes dans les réactions catalytiques (Elfick, A., 2006).

### 4.4. Fullerènes

Les Fullerènes (figure 18) sont des molécules sphériques composées de 60 atomes de carbone ( $C_{60}$ ). Elles sont envisagées dans beaucoup d'applications et ont notamment été utilisées comme roues pour la plus petite voiture du monde (figure 18). Celle-ci est mise en mouvement par simple variation de température (Halford, 2005).



Figure 18 : à gauche : fullerène ; à droite : nanocar.

#### 4.5. Nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (fig.19) sont considérés comme le matériau le plus résistant et le plus dur dans la nature (100 fois plus résistant que l'acier pour une densité 6 fois moins importante). Il a des propriétés fantastiques. Par exemple, suivant son enroulement, il peut-être semi-conducteur ou métallique. Il est d'ailleurs utilisé pour fabriquer le plus petit transistor au monde.

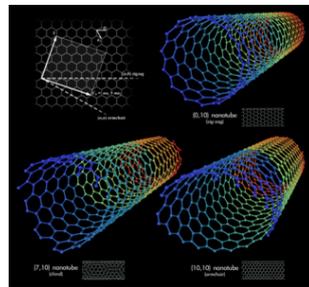


Figure 19 : Nanotubes de carbone.

Il peut également être utilisé dans les nanocomposites. Dans ce cas, les nanotubes sont mis en solution avec des copolymères (fig.20). Ces copolymères s'accrochent aux nanotubes, ce qui permet de les espacer de façon homogène et par conséquent de former des matériaux composites plus durs. Ceux-ci sont par exemple utilisés dans les raquettes de tennis, les vêtements militaires, les clubs de golf, etc. pour renforcer ces matériaux tout en les allégeant.

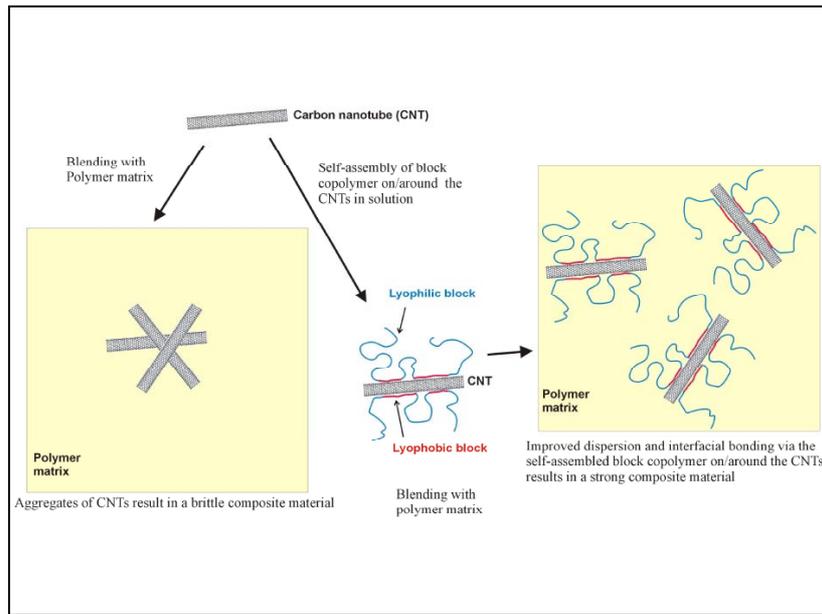


Figure 20 : Schématisation du principe de fabrication des nanocomposites

## 5. Conclusions : Avenir?

Il faut savoir que, dans beaucoup de pays, les budgets consacrés aux recherches dans le domaine nanotechnologique augmentent de façon exponentielle. Certains pensent d'ailleurs que les nanotechnologies représentent la prochaine révolution, comme le schématise la figure 21.

Voici maintenant quelques applications « imaginaires » (Levy, 2006) qui pourraient bouleverser totalement notre mode de vie actuel. Comme déjà dit, les nanotechnologies vont permettre d'améliorer significativement les performances des ordinateurs mais aussi la capacité de mémoire informatique. En médecine, il est envisagé de fabriquer des nano-robots voyageant dans notre corps pour aider notre système immunitaire. Il est même prévu d'augmenter les capacités du cerveau, d'augmenter la durée de vie dans un état de jeunesse préservé, de réaliser une intelligence artificielle, etc.

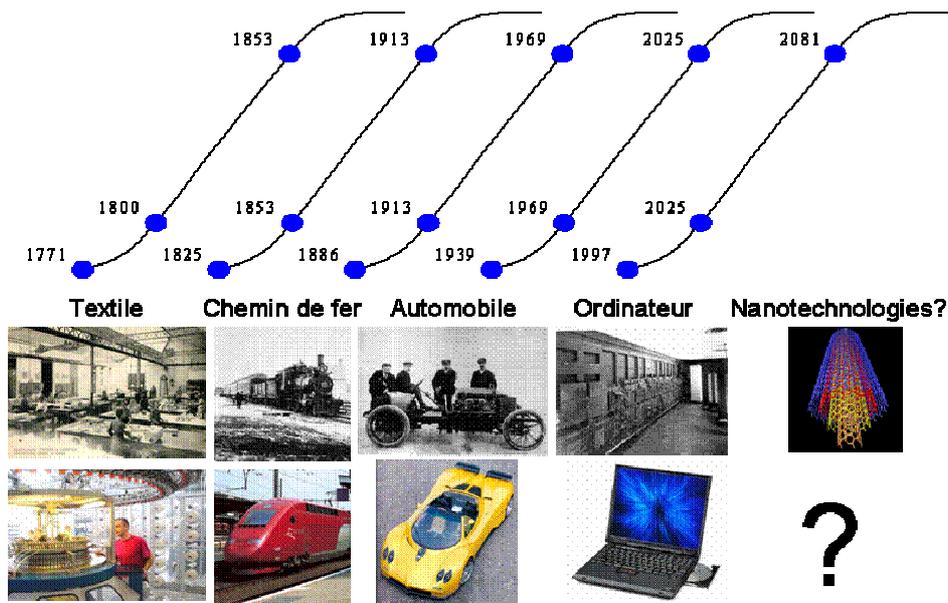


Figure 21 : Schématisation des différentes révolutions

D'un point de vue écologique, il sera envisageable de recycler complètement les déchets, d'éliminer le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et donc de gérer l'effet de serre. Concernant l'exploration de l'espace, il sera possible de « terraformer » d'autres planètes, de créer un ascenseur pour l'espace à l'aide de nanotubes de carbone, par exemple. Des écrans à affichage variable pourront être créés, l'affichage 3D sera tellement réaliste qu'il sera impossible de distinguer l'imaginaire de la réalité. Cette révolution ira même jusqu'à la fabrication d'un « micro-onde » capable de fabriquer n'importe quel objet, une paire de chaussures, un steak plus vrai que nature, mais pourquoi pas des billets de 50 euros. Il faut également savoir que l'armée s'intéresse aux nanotechnologies. Imaginez des millions de nanorobots invisibles à l'œil nu, capables de tuer une personne particulière par la reconnaissance de son ADN, des nanomachines se reproduisant indéfiniment et tuant tout sur leur passage. Imaginez maintenant que nous perdions le contrôle de ces nanomachines autoreproductibles. Ce serait alors la fin de la vie sur terre.

C'est pourquoi des scientifiques essaient déjà de ralentir l'évolution des nanotechnologies avant que des limites claires et précises ne soient établies. En opposition à ce ralentissement, la compétition internationale accélère ce développement.

Cette brève introduction sur les nanotechnologies amène donc à deux questions :

Nanotechnologies? Oui, mais où et comment placer les limites?

Science fiction ou avenir proche? Mais que pensaient nos aïeux du voyage sur la lune, de l'informatique, etc.?

## 6. Références bibliographiques

BERNARD A., RENAUD J. P., MICHEL B., BOSSHARD H. R., and DELAMARCHE E. *Microcontact Printing of Proteins. Advanced Materials*, **12**, No 14, 19 July 2000.

BIGGS M.. *Introduction to Nanotechnology*. University of Edinburgh: Course Notes, 2006.

CHEUNG R. *Nanotechnology – The Top-Down Approach*. University of Edinburgh: Scottish Microelectronics Centre : Course Notes, 2006.

ELFICK, A. *Bionanotechnology*. University of Edinburgh: Course Notes, 2006.

GEIM A. K., DUBONOS S. V., GRIGORIEVA I. V., NOVOSELOV K. S., ZHUKOV A. A., and SHAPOVAL S. YU. *Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. Nature Materials* **2**, 2003, p. 461-463.

HALFORD B. *Nanocar Rolls into Action. Chemical and Engineering News*, **Volume 83**, n°43, 2005, p.13.

HARTMANN U. *An Elementary Introduction to Atomic Force Microscopy and Related Methods*. University of Saarbrücken : Institute of Experimental Physics, 1997.

HUIE J. C. *Guided Molecular Self-Assembly: a Review of Recent Efforts*. Nanosonic. *Smart Materials and Structure*, **vol. 12**, n°2, 2003, p. 264-271.

KOUTSOS V. *Introduction to Atomic Force Microscopy (AFM)*. University of Edinburgh : School of Engineering and Electronics & Centre for Materials Science and Engineering : Course Notes, 2006.

LEVY F. *Introduction à la Nanotechnologie Moléculaire*. Académie Interdisciplinaire des Sciences de Paris, 2006. Available at : <URL:<http://www.spirtech.com/flv/nano/>> [Accessed 16 October 2006].

Nanospectra Biosciences, 2006. AuroLase Cancer Therapy. Available at :  
<URL: <http://www.nanospectra.com/>> [Accessed 16 October 2006].

National Science and Technology Council, National Technology Initiative:  
Leading to the Next Industrial Revolution, op. cit., p. 15.

Neurotech. ECT Technology. Available at :

<URL:<http://www.neurotech.fr/>> [Accessed 16 October 2006].

MERKLE R. C. *Adding Positional Control to Chemical Synthesis*. Xerox Corporation, 1993.

PINER R. D., Zhu J., Xu F., Hong S., et Mirkin C. A. “Dip-Pen” Nano-  
*lithography*. *SCIENCE* **VOL 283**, 1999, p 661.

WAUTELET M., et coll. *Les Nanotechnologies*. Paris : Dunod, 2003.

WAUTELET M., et GUIBBIERS G. *Macro-, Micro- et Nanosystèmes: des Phy-  
siques Différentes?* Grenoble : Congrès français de Thermique, 2003.

WILBUR J. L., KUMAR A., BIEBUYCK H. A., KIM E., and WHISTESIDES G.  
M. *Microcontact Printing of Self-Assembled Monolayers: Applications in  
Microfabrication*. Harvard University: Department of Chemistry. IOP Pub-  
lishing Ltd, 1996.