

# Les nanos : applications et enjeux

Nous sommes déjà entrés dans le nanomonde. Il existe aujourd'hui sur le marché plus de huit cents produits dont la fabrication fait appel aux nanotechnologies : écrans plats à base de LED organiques, pneus de voiture contenant des nano-céramiques, crèmes solaires à base de nanoparticules de titane, peintures pour automobiles qui ne se rayent pas, raquettes de tennis dont le cadre est renforcé par des nanotubes de carbone... Ce nombre ne cesse de croître : selon certaines estimations, le marché mondial des produits nano dépassera 1 000 milliards de dollars en 2015.

par Ilarion PAVEL\*

Quel est l'intérêt des nanotechnologies ? Elles permettent de fabriquer des produits plus petits, plus légers et moins chers : des ordinateurs plus performants, des moyens de communication plus rapides, des traitements médicaux plus efficaces, un cadre de vie plus agréable, et cela, en respectant l'environnement.

## PRÉHISTOIRE DES NANOTECHNOLOGIES

Des produits nano existent depuis longtemps. Par exemple, la coupe de Lycurgue, conservée au British Museum, qui date du IV<sup>e</sup> siècle. Eclairée en réflexion, elle est verte, alors qu'en transmission elle est rouge : ce phénomène surprenant s'explique par la présence, dans le verre, de particules d'or et d'argent de taille nanométrique (voir les photos 1 et 2). Les fameuses lames de Damas, fabriquées avant le XI<sup>e</sup> siècle, doivent leur solidité exceptionnelle à des nanoparticules de carbone présentes dans l'acier qui les constitue. Quant aux couleurs vives des vitraux des cathédrales gothiques, elles sont dues à des nanoparticules d'or.

Nos ancêtres ont fabriqué ces produits par pur hasard, par un «accident heureux», grâce à leur travail et leur

ingéniosité, sans posséder les moindres connaissances en nanotechnologies et cela doit nous inspirer un profond respect.

Ce n'est que dans les années 1980 que les nanotechnologies commencent à se développer, avec l'invention du microscope à effet tunnel par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer (prix Nobel de physique en 1986), puis avec la découverte des fullerènes par Harold Kroto, Richard Smalley et Robert Curl (prix Nobel de chimie en 1996). Désormais, il s'agit d'une ingénierie de la matière réalisée intentionnellement et non plus par hasard. Depuis les années 1990, elles connaissent un grand développement.

L'enjeu des nanotechnologies : concevoir et fabriquer des structures, des dispositifs et des systèmes en structurant la matière au niveau atomique ou moléculaire, à une échelle située en dessous de 100 nanomètres (rappelons qu'un nanomètre (nm) représente un milliardième de mètre, soit 0,000 000 001 mètre ; il est environ 500 000 fois plus petit que l'épaisseur d'un trait de stylo à bille, 30 000 fois plus fin que l'épaisseur d'un cheveu et représente quatre atomes de silicium mis l'un à côté de l'autre).

\* Ingénieur en chef des Mines (ilarion.pavel@mines.org).



Photos 1 et 2 : La coupe de Lycurgue, verte par réflexion, rouge en transmission. (© British Museum).



A l'échelle nanométrique, des propriétés et des comportements nouveaux apparaissent, qui sont spécifiques à cette petite échelle et différents de ceux du matériau massif d'origine de la nanoparticule : effets quantiques, grande réactivité chimique, effets spécifiques dus à la grande surface de contact. Par exemple, l'or, à l'échelle nanométrique, est de couleur rouge, un effet dû à des phénomènes quantiques faisant intervenir les plasmons de surface (ce sont des oscillations collectives d'électrons qui se produisent à la surface d'un métal) et il est chimiquement réactif, contrairement à l'or massif, qui doit précisément sa valeur à sa passivité chimique qui lui donne une grande stabilité dans le temps. Étant de petite dimension, une nanoparticule comporte relativement peu d'atomes (quelques centaines ou quelques milliers), dont une forte proportion est située en surface, ce qui induit des contraintes sur son réseau atomique, le déforme, le réarrange et engendre beaucoup de défauts de surface : ce sont ces derniers qui augmentent la réactivité de la nanoparticule par rapport au matériau massif (voir la photo 3).

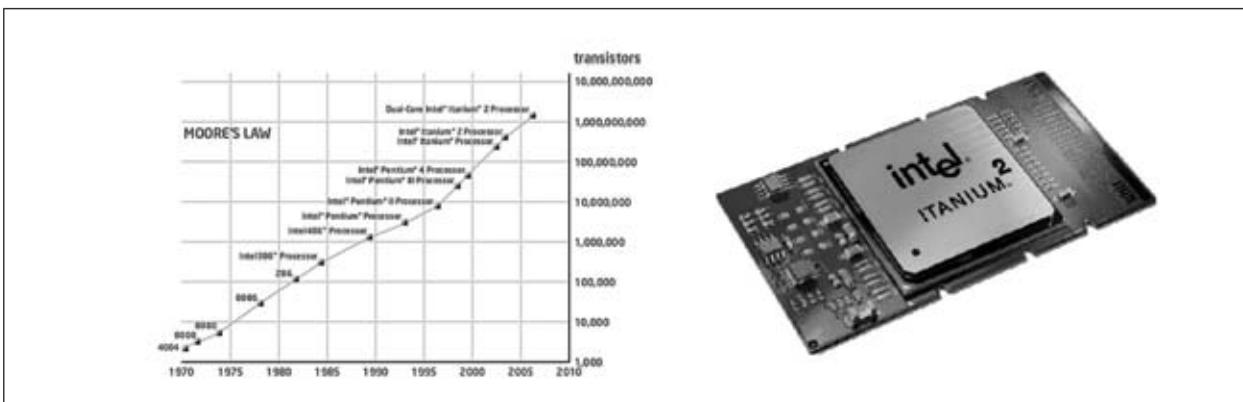


Photo 3 : Une solution colloïdale d'or nanométrique est de couleur rouge.

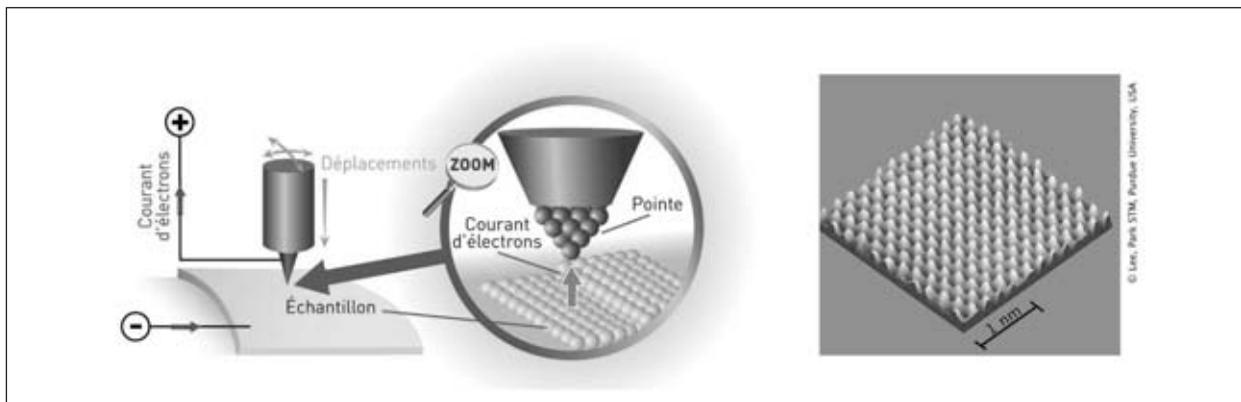
## LA MICROÉLECTRONIQUE ET LES MICROSYSTÈMES

Revenons au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. L'invention (en 1948) du transistor par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley (prix Nobel de physique en 1956) marque le début d'un progrès fulgurant de l'électronique. En raison de sa petite taille et de sa faible consommation, le transistor remplace rapidement les tubes à vide, ouvrant la voie à la miniaturisation. En 1959, Jack Kilby (prix Nobel de physique en 2000) et Robert Noyce ouvrent la voie à la microélectronique en réalisant le premier circuit intégré : ses composants électroniques sont interconnectés, dès leur fabrication, sur un support commun en silicium, appelé puce. Depuis quarante ans, le nombre des transistors sur la surface d'une puce double tous les dix-huit mois (ce phénomène est décrit par la loi de Moore). Actuellement, un microprocesseur d'ordinateur contient plus d'un milliard de transistors, dont la taille spécifique est de 45 nm (voir le graphique et la photo 4).

Les technologies développées dans l'industrie microélectronique ont été transposées avec succès dans la fabrication de microsystèmes : accéléromètre, laboratoire sur puces, puce à ADN, distributeur d'insuline. Les applications concernent aussi bien la sécurité et la navigation aérienne, que les outils médicaux de diagnostic et de soin. Elles sont fondées sur le concept de fabrication appelé « *top-down* » (par voie descendante) :



Graphique et photo 4 : Loi de Moore : le nombre de transistors sur la surface d'une puce double tous les 18 mois. (© Intel).



Photos 5 et 6 : Image d'une surface de graphite vue avec le microscope à effet tunnel (© Bruno Fouquet).

on part d'un matériau, on le découpe et on le « sculpte » pour fabriquer un composant aux dimensions les plus petites possibles.

Mais cette course à la miniaturisation devient aujourd'hui de plus en plus difficile. D'abord pour des raisons techniques : plus les transistors sont petits, plus il est difficile de dissiper la chaleur que produit leur fonctionnement. De plus, à l'échelle nanométrique, les lois de la physique quantique commencent à se manifester et elles sont susceptibles de perturber le fonctionnement normal des transistors, qui sont conçus sur les fondements de la physique classique.

Ensuite, pour des raisons économiques. Certes, avec la production de masse, le coût de fabrication d'un transistor diminue, mais, en même temps, les investissements nécessaires à la mise en place de procédés de fabrication de plus en plus sophistiqués deviennent prohibitifs : aujourd'hui, le coût d'une usine de fabrication de microprocesseurs atteint 3 milliards d'euros. Un changement de technologie est donc nécessaire et les nanotechnologies pourraient apporter une réponse.

## DÉCOUVERTES SCIENTIFIQUES DANS LE NANOMONDE

Le premier instrument mis au point pour voir le nanomonde fut le microscope à effet tunnel. Pendant que sa pointe métallique très fine balaye la surface du matériau à quelques nanomètres de distance, seulement, de celui-ci, on applique une tension électrique qui fait passer des électrons, par « effet tunnel », entre la pointe métallique et la surface de l'objet. Après avoir enregistré les variations de ce courant, on reconstitue par ordinateur le relief de la surface survolée avec une précision de l'ordre de l'atome, soit 0,1 nm. Mais le microscope à effet tunnel permet de visualiser exclusivement des matériaux conducteurs (voir les photos 5 et 6).

Pour examiner des matériaux isolants (comme les polymères, les céramiques ou les cellules vivantes), on a conçu le microscope à force atomique. Celui-ci dispose d'une pointe fixée sur un bras de levier flexible, qui balaye et interagit avec la surface du matériau à obser-

ver en suivant le relief. La déformation du levier, mesurée à l'aide d'un faisceau laser, est enregistrée par un ordinateur.

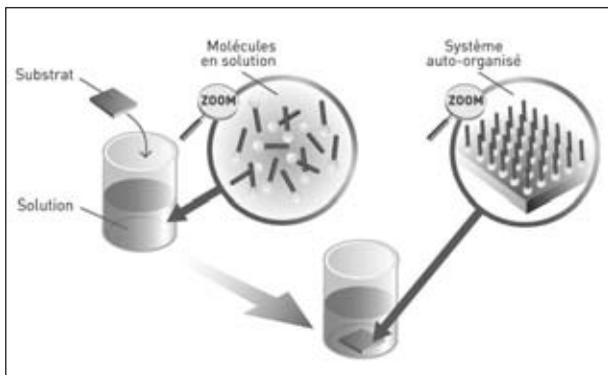
Ces instruments étaient initialement conçus pour observer la surface des matériaux. Aujourd'hui, on peut aussi les utiliser pour déplacer les atomes un par un, à l'instar d'une « pince à atomes », afin d'assembler la matière atome par atome et de construire des édifices moléculaires que l'on peut intégrer dans des systèmes plus grands : c'est la technique de fabrication suivant le concept appelé « *bottom-up* » (voie ascendante). Mais construire des nano-objets à l'aide d'un microscope à force atomique reste une technique de laboratoire que l'on peut qualifier d'artisanale : elle ne permettra pas une production industrielle, car déplacer les atomes, un par un, avec la « pince à atomes » demanderait beaucoup trop de temps.

D'autres solutions émergent peu à peu, qui exploitent à la fois les avancées de la physique, de la chimie et de la biologie pour fabriquer des objets nanométriques en série.

Une des méthodes prometteuses, inspirée de la physique des surfaces, est l'auto-organisation, qu'illustre le processus de la formation de la buée sur les vitres : la vapeur d'eau se condense de façon uniforme sur la surface de la vitre en formant une multitude de microgouttes régulières. Ainsi, les exemples les plus réussis de nano-systèmes bâtis selon la voie ascendante sont ceux réalisés par la nature dans un processus d'évolution de plus de 3,5 milliards d'années, qui a donné naissance au monde du vivant, si riche et si complexe, que nous connaissons aujourd'hui (voir la photo 7).

D'autres techniques nouvelles permettant la fabrication industrielle de nano-objets sont en cours de développement. En attendant, plusieurs types de nanoparticules sont déjà utilisés :

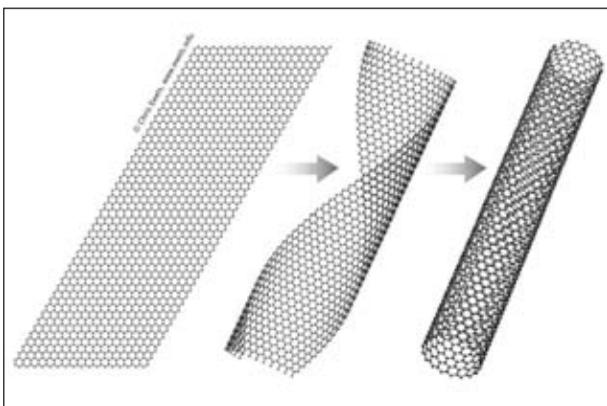
- le nanotube de carbone, mis en évidence en 1991 par Sumio Iijima (NEC, Japon) est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal (évoquant un nid d'abeilles) et enroulé sur lui-même, comme un cigare. Son diamètre est de l'ordre du nanomètre et sa longueur peut atteindre



**Photo 7 :** Auto-organisation : les molécules, qui ont une terminaison spécifique (en jaune), s'attachent au substrat et s'ordonnent (© Bruno Fouquet).

plusieurs micromètres. Les nanotubes de carbone sont cent fois plus résistants que l'acier, et six fois plus légers. Ils sont déjà utilisés dans la fabrication de matériaux composites à hautes performances pour articles sportifs : cadres de vélo, raquettes de tennis, clubs de golf. Du fait de la petite taille caractéristique de toute nanoparticule, les nanotubes ont une très grande surface de contact, ce qui les rend intéressants dans la catalyse chimique, le filtrage de polluants, la fabrication d'électrodes pour batteries électriques ou les piles à combustible. Leurs propriétés électriques spéciales, très sensibles lorsque des molécules étrangères s'y accrochent, les rendent particulièrement adaptés à un usage dans des capteurs chimiques et biologiques (voir la photo 8) ;

- des nanoparticules d'oxyde de titane sont déjà couramment utilisées comme filtres dans les crèmes solaires pour leur capacité d'absorber les rayons ultraviolets. Si elles étaient de taille micrométrique, ces particules diffuseraient la lumière visible, ce qui rendrait la crème de couleur blanche, donc peu esthétique. En diminuant leur dimension jusqu'à l'échelle nanométrique, elles ne diffusent plus la lumière, mais elles gardent leur propriété d'absorption des ultraviolets.



**Photo 8 :** Structure d'un nanotube de carbone. (© Chris Ewels, [www.ewels.info](http://www.ewels.info)).

## TROIS CHAMPS D'APPLICATION DES NANOTECHNOLOGIES : L'ÉLECTRONIQUE, LE BIOMÉDICAL ET LES MATÉRIAUX

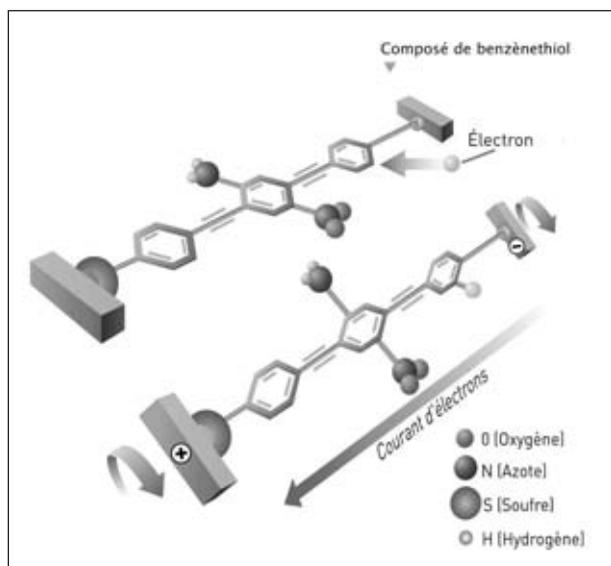
Les nanotechnologies vont permettre de poursuivre les progrès de l'électronique :

- diodes électroluminescentes organiques (OLED) : ces dernières années, les OLED se sont imposées comme une technologie bon marché pour la fabrication des écrans plats et elles ouvrent de nouvelles perspectives pour l'éclairage. Une OLED est constituée d'un polymère électroluminescent pris en sandwich entre deux électrodes : une cathode en aluminium ou en calcium, qui injecte des électrons, et une anode transparente en oxyde d'indium-étain, qui injecte des « trous » (des manques d'électrons). C'est dans le polymère qu'a lieu la recombinaison des électrons et des trous, ce qui engendre de la lumière qui s'échappe ensuite par l'anode transparente. Mais l'indium est un élément chimique rare et l'électrode d'indium-étain est fragile, donc peu flexible. La remplacer par des nanotubes de carbone permettra de fabriquer des anodes plus flexibles et moins chères ;

- spintronique : l'électronique d'aujourd'hui est fondée sur la propriété qu'a l'électron, chargé électriquement, d'interagir avec les champs électriques. Mais l'électron peut aussi, comme une minuscule boussole, s'orienter dans les champs magnétiques grâce à son *spin*, qui peut être assimilé à sa rotation autour d'un axe (comme la rotation d'une toupie). C'est sur ce type d'interaction qu'est fondée la magnétorésistance géante, un effet quantique observé quand on superpose en alternance des couches de fer et de cuivre d'épaisseur nanométrique. La résistance électrique mesurée perpendiculairement à ces couches dépend de l'orientation magnétique relative des couches de fer, qui dépend elle-même du champ magnétique externe. Grâce à l'application de ce principe, les têtes de lecture des disques durs des ordinateurs d'aujourd'hui sont extrêmement sensibles, ce qui a permis de réduire la taille des domaines magnétiques du disque dur et donc d'augmenter sa capacité. Les recherches continuent pour développer une électronique de *spin* (ou *spintronique*) qui permettrait de mettre au point de nouveaux composants électroniques, en particulier des mémoires miniaturisées ;

- transistors moléculaires : un grand défi de l'électronique est de remplacer le transistor classique par une molécule chimique ou biologique fonctionnant comme un interrupteur de courant électrique, ouvrant ainsi la voie à l'électronique moléculaire. La taille du transistor pourrait être divisée par mille, ce qui permettrait de fabriquer des ordinateurs beaucoup plus petits, plus rapides, moins chers et consommant moins d'électricité (voir la photo 9) ;

- ordinateur et cryptographie quantiques : l'information et la communication quantiques sont un autre domaine d'avenir. L'enjeu est de réaliser un ordinateur



**Photo 9 :** Transistor moléculaire à base de la molécule de benzénethiol (© Bruno Fouquet).

quantique doté d'une immense puissance de calcul, outrepassant les capacités de tous les ordinateurs classiques et permettant notamment des communications totalement sécurisées, impossibles à intercepter sans que l'on ne s'en rende compte. Aujourd'hui, les avancées de la cryptographie quantique permettent des applications industrielles dans la transmission sécurisée des clés de cryptage, mais en raison des difficultés techniques pour mettre au point un système physique qui soit capable d'effectuer un calcul quantique (il faut minimiser le couplage avec l'environnement afin d'empêcher la perte rapide de cohérence quantique), l'ordinateur quantique ne sera pas réalisé dans un futur proche ;

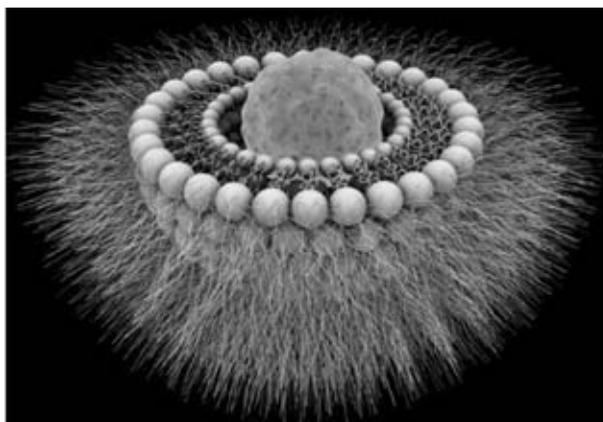
En biomédecine, les applications sont également prometteuses. Dans le passé, déjà, les avancées de la physique, en particulier de l'optique, ainsi que le développement de l'ingénierie ont apporté une contribution cruciale au développement des moyens d'observation du monde vivant. Sans l'invention du microscope, au XVII<sup>e</sup> siècle, par Zacharias Jansen, et sans les améliorations qu'y a apportées Anton von Leeuwenhoek, les cours de biologie se limiteraient encore aujourd'hui à la dissection d'animaux et le soin médical à l'utilisation de plantes médicinales. Sans le microscope électronique, on aurait été incapable de voir la structure d'une cellule et sans les rayons X, le code génétique garderait encore ses secrets. Plusieurs applications sont en cours de développement :

- vecteurs de médicaments : ils sont conçus à base de vésicules, appelées liposomes, qui encapsulent le médicament, ou à base de dendrimères, des molécules très ramifiées (comme les branches d'un arbre, d'où leur nom), sur lesquelles le médicament est accroché. Le vecteur empêche la dilution du médicament dans le sang et sa dégradation à travers les barrières immunitaires du corps humain : le médicament n'est libéré de son vecteur qu'une fois arrivé à la cible visée (un orga-

ne, un tissu, voire une cellule) et le vecteur est alors dégradé par l'organisme. La vectorisation permet ainsi de mieux cibler le médicament et donc d'en diminuer la dose administrée (et ainsi les effets secondaires) (voir la photo 10) ;

- imagerie médicale : des nanoparticules magnétiques, utilisées comme agents de contraste, augmentent localement le champ magnétique mesuré par les appareils d'imagerie par résonance magnétique. Si l'image met en évidence une tumeur, on peut alors attacher aux nanoparticules des anticorps qui vont se fixer spécifiquement sur cette tumeur. A l'aide de rayonnements infrarouges ou micro-ondes que captent les nanoparticules, on chauffe la tumeur, ce qui permet de la détruire ;

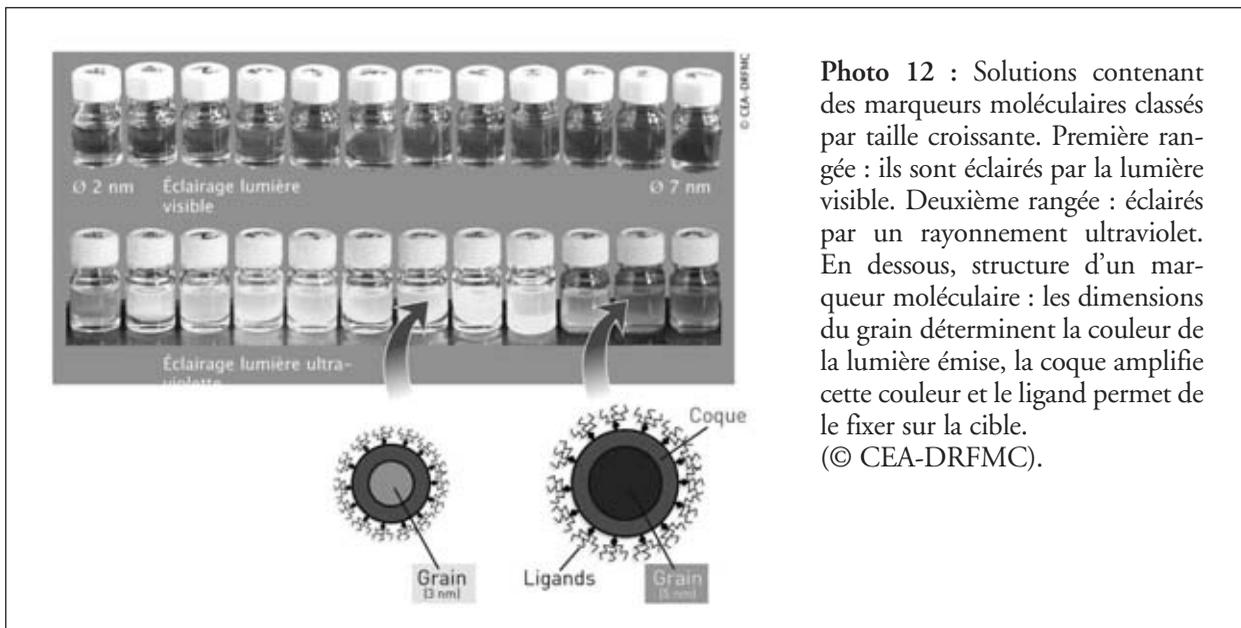
- implants et prothèses médicales : on recouvre la surface des implants et des prothèses médicales d'un revêtement nano-poreux en titane, qui les rend davantage biocompatibles et plus faciles à tolérer par le patient. Des structures nano-poreuses en apatite (phosphate de calcium) sont par ailleurs utilisées comme échafaudage pour la régénération de l'os en cas de fracture : grâce à la structure lacunaire de cette structure nano-poreuse, les cellules osseuses se développent plus facilement et remplacent l'apatite nano-poreuse par de l'os (voir la photo 11).



**Photo 10 :** Vecteur de médicament à base de liposome : le médicament est encapsulé par le liposome. Des polymères y sont attachés pour lui permettre de traverser les barrières immunitaires du corps humain (© François Caillaud, Sagascience, CNRS).



**Photo 11 :** Prothèse de fémur recouverte de titane nano-poreux (© Primal Cry).



**Photo 12 :** Solutions contenant des marqueurs moléculaires classés par taille croissante. Première rangée : ils sont éclairés par la lumière visible. Deuxième rangée : éclairés par un rayonnement ultraviolet. En dessous, structure d'un marqueur moléculaire : les dimensions du grain déterminent la couleur de la lumière émise, la coque amplifie cette couleur et le ligand permet de le fixer sur la cible. (© CEA-DRFMC).

- **marqueurs moléculaires :** certaines nanoparticules émettent de la lumière quand elles sont éclairées en ultraviolet. Ce phénomène, appelé fluorescence, est dû à des effets quantiques qui apparaissent en raison de leurs très petites dimensions. Elles peuvent être utilisées comme sondes fluorescentes, des marqueurs moléculaires qui suivent la trace des réactions chimiques ou des processus biologiques à l'intérieur des cellules de l'organisme humain (voir la photo 12).

D'autres domaines très prometteurs de la médecine, comme la thérapie génique ou l'utilisation des cellules souches, auront sans doute besoin d'outils perfectionnés que seules les nanotechnologies sont en mesure de leur fournir.

Le troisième champ d'application important est la science des matériaux. Au XX<sup>e</sup> siècle, déjà, c'est l'invention de nouveaux matériaux qui a largement permis les progrès spectaculaires de l'aéronautique, de l'exploration spatiale et océanique et de l'observation astronomique. Un bon nombre de ces matériaux ont ensuite trouvé des applications dans des objets courants, comme les automobiles, les bateaux à voile, les skis, les raquettes de tennis, les vestes en Goretex ou les poêles à frêre. Les nanotechnologies permettent d'améliorer des matériaux existants ou d'en mettre au point de nouveaux :

- **polymères composites :** un enjeu important pour l'aéronautique est de remplacer le fuselage métallique des avions par des matériaux composites à base de polymères, moins chers, plus légers et plus résistants à la corrosion. Mais, contrairement aux métaux, les polymères sont des isolants électriques, ce qui pose problème en cas de coup de foudre sur l'avion. L'adjonction de nanotubes de carbone au matériau polymère peut rendre celui-ci conducteur. Par ailleurs, la faible résistance au feu des polymères peut être améliorée par l'ajout de nanoparticules de céramique, qui les rendent ignifuges ;

- **revêtements antibactériens :** jusqu'à présent, on utilisait des substances chimiques antiseptiques. Une autre

solution consiste à recourir à des revêtements à base de nanoparticules d'argent. En effet, les ions argent ont un fort effet antibactérien : ils fragilisent la membrane cellulaire de la bactérie, bloquent la réplication de son ADN et perturbent la respiration cellulaire. Ce type de revêtement peut être utilisé dans les installations de ventilation, dans les hôpitaux ou dans la fabrication des instruments médicaux ;

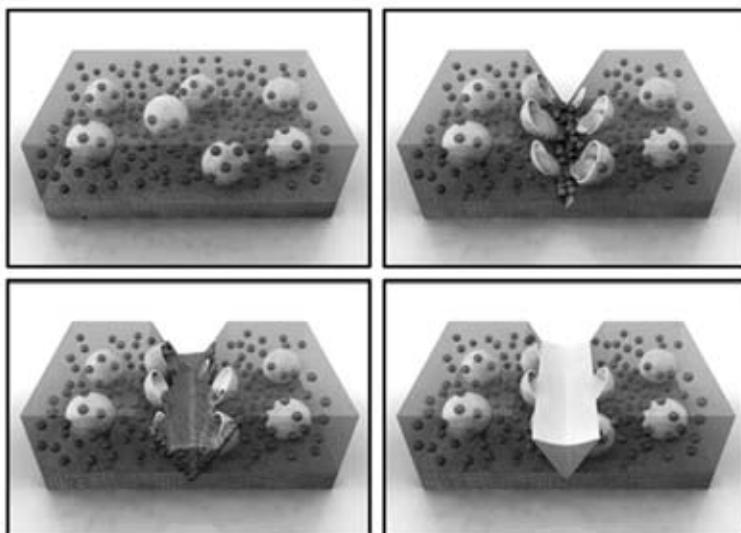
- **matériaux auto-réparateurs :** on introduit dans le matériau des polymères encapsulés, ainsi qu'un durcisseur (une substance chimique ayant la propriété, comme son nom l'indique, de durcir le polymère). En cas de fissure, les capsules éclatent et libèrent le polymère, qui, en s'écoulant dans la fissure, entre en contact avec le durcisseur et répare ainsi le matériau (voir la photo 13) ;

- **isolants thermiques :** il s'agit d'utiliser un aérogel, un matériau nano-poreux contenant jusqu'à 99,8 % d'air, ce qui lui confère une capacité d'isolation exceptionnelle, l'air étant un très mauvais conducteur de chaleur. Un grand défi serait de fabriquer des aérogels parfaitement transparents, afin de pouvoir les utiliser pour l'isolation des vitres (voir la photo 14).

Par leur nature, les nanotechnologies constituent un domaine interdisciplinaire et elles promettent des applications dans de multiples secteurs industriels (électronique, biotechnologies, santé, énergie, environnement, sécurité) : c'est ce qu'on appelle une technologie diffusante (comme l'électricité l'a été, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle).

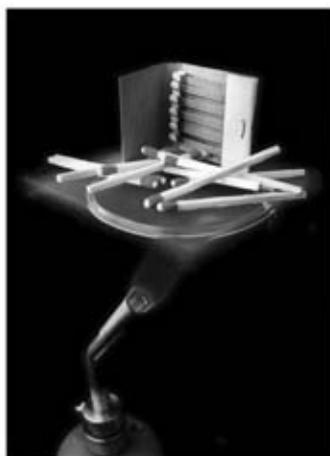
## ÉNERGIE, ENVIRONNEMENT, SÉCURITÉ

De la production d'énergie propre à la diminution de l'impact écologique des activités humaines, les applications industrielles des nanotechnologies sont variées :



**Photo 13** : Matériau auto-réparateur : en cas de fissure, les capsules éclatent, libérant le polymère, qui réagit avec le durcisseur et répare le dommage.

(© Advanced Materials).

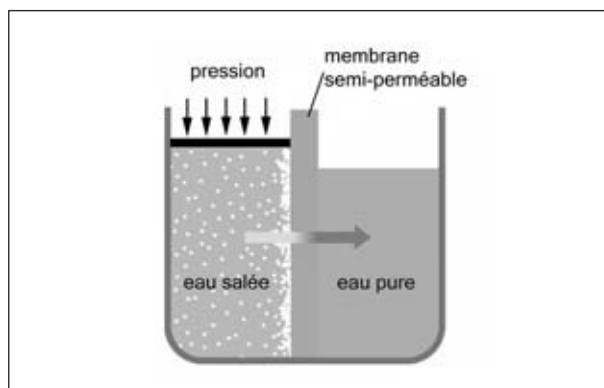


**Photo 14** : Les aérogels sont des isolants thermiques exceptionnels (© NASA/JPL-Caltech).

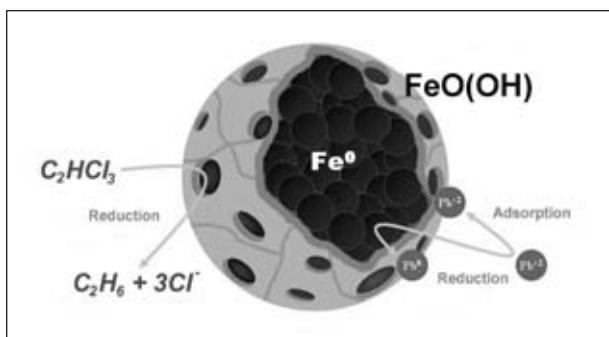
- cellules photovoltaïques : les cellules photovoltaïques traditionnelles, à base de silicium ou d'arséniure de gallium, nécessitent des matériaux d'une grande pureté et des processus technologiques coûteux. Les efforts actuels visent à les remplacer par des matériaux organiques, qui mimeraient la photosynthèse des plantes. Ces nouvelles cellules photovoltaïques, moins coûteuses, sont en outre flexibles : elles peuvent donc épouser des surfaces courbes. Elles utilisent un matériau organique, appelé colorant, dont la molécule, en absorbant la lumière, passe dans un état excité, puis cède un électron à une nanoparticule de dioxyde de titane, qui sera finalement conduit vers une des électrodes. L'ensemble est plongé dans une solution d'iode, qui assure la conduction électrique entre le colorant et la deuxième électrode ;
- piles à combustible : elles pourraient équiper les voitures électriques et les appareils électriques portables. Elles sont l'énergie propre par excellence, car leur seul résidu est de l'eau. Leur fonctionnement repose sur la décomposition catalytique de l'atome d'hydrogène en un proton et un électron, qui a lieu à l'anode. Tandis

que le proton est transporté à l'intérieur de la pile, *via* une membrane polymère, vers la cathode, où il se combine à l'oxygène pour produire de l'eau, l'électron est forcé de rejoindre la même cathode, mais par le circuit extérieur, en produisant de l'électricité. L'utilisation de catalyseurs nano-poreux, grâce à leur grande surface de contact, augmente le rendement des piles à combustible. Des recherches visent, par ailleurs, à remplacer le platine par des nanomatériaux moins onéreux ;

- osmose inverse : quand on sépare de l'eau pure et de l'eau salée par une membrane semi-perméable (qui laisse passer l'eau, mais pas le sel), l'eau tend à passer de la partie pure vers la partie salée : ce phénomène est appelé osmose. Mais en augmentant suffisamment la pression dans la partie salée, on inverse le sens du déplacement : c'est l'osmose inverse. Les nanotechnologies permettent de fabriquer des membranes nano-poreuses plus résistantes et nécessitant une pression moins élevée, et donc de diminuer la consommation d'énergie pour désaliniser l'eau de mer, par exemple (voir la photo 15) ;
- dépollution des sols : conséquence des activités industrielles, certains sols sont contaminés par des substances toxiques, telles que les solvants organiques chlorurés



**Photo 15** : Osmose inverse : en appliquant une pression, l'eau traverse la membrane nano-poreuse, mais les ions de sel sont arrêtés.



**Photo 16 :** Nanoparticule de fer utilisée dans la dépollution des sols : en s'oxydant, elle réduit le solvant chloruré (trichloréthylène) en hydrocarbure (éthylène) et en ions de chlore non toxiques. Les ions de plomb  $Pb^{+2}$  sont réduits en plomb métallique, qui se fixe dans le sol (© www.lawandenvironment.com).

(trichloréthylène, tétrachlorure de carbone, dioxine) ou les métaux lourds (chrome, plomb). Grâce à leur grande surface spécifique, des nanoparticules de fer, injectées dans le sol contaminé, réagissent avec les substances toxiques en les réduisant en composés moins nocifs. Par exemple, les ions Cr (VI) présents dans les cendres volantes des incinérateurs d'ordures ménagères, des ions très toxiques et solubles, sont réduits en ions Cr (III) non toxiques et insolubles, qui se fixent dans le sol et ne seront donc plus entraînés par la pluie dans les nappes phréatiques. De même, les nanoparticules de fer agissent sur les solvants chlorurés en les réduisant en hydrocarbures et en ions de chlore, qui ne sont pas toxiques (voir la photo 16) ;

- purification de l'air : le trafic automobile dégrade la qualité de l'air à cause des émanations de monoxyde et de dioxyde d'azote, et de composés organiques volatils, qui peuvent causer des troubles respiratoires. On pourrait incorporer à la peinture des bâtiments urbains des nanoparticules d'oxyde de titane, qui ont un fort effet photo-catalytique et peuvent dégrader ces émanations toxiques. Sous l'influence des ultraviolets solaires, l'oxyde de titane crée des radicaux libres, des substances chimiques ayant des électrons non appariés, et donc très réactives. Les oxydes d'azote présents dans l'air sont ainsi transformés en ions nitrates, beaucoup moins toxiques.

Ces techniques de nano-filtration et de photo-catalyse sont également utilisées pour traiter les eaux usées, tant industrielles que domestiques.

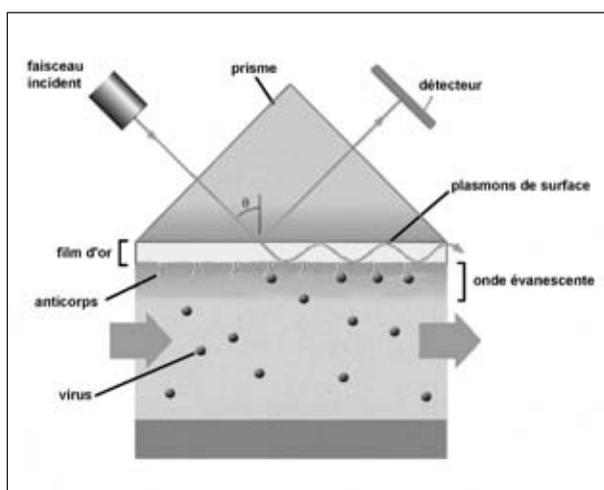
Enfin, un autre secteur industriel concerné est celui de la sécurité civile :

- détection d'explosifs : il est facile de fabriquer des explosifs. Il n'est nul besoin d'installations compliquées : il suffit d'avoir quelques connaissances de base en chimie et quelques substances chimiques d'usage courant, par exemple le TATP (tri-acétone tri-peroxyde), qui peut être synthétisé à partir d'acétone (un solvant utilisé pour enlever le vernis à ongles), d'eau oxygénée et d'acide sulfurique, ce dernier jouant le rôle de catalyseur. Contrairement à la plupart des explosifs, le

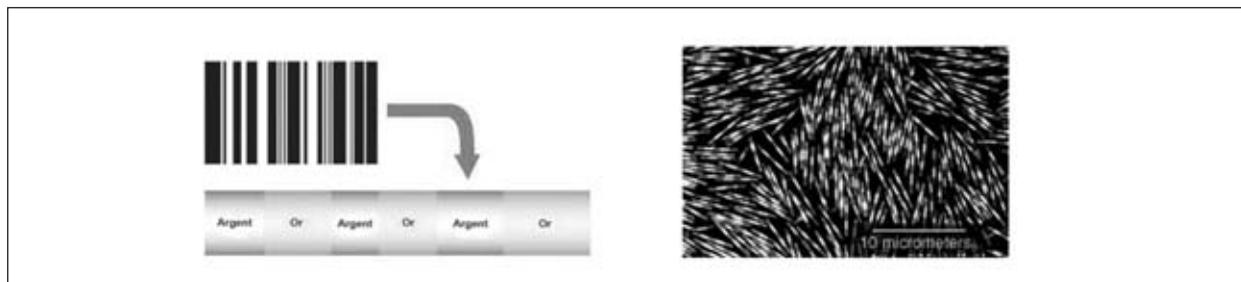
TATP ne contient pas d'azote, ce qui le rend difficile à détecter par les systèmes classiques, fondés sur la mise en évidence de cet élément chimique. Relativement puissant et faisant partie des rares explosifs à pouvoir détonner en milieu humide ou dans l'eau, il est la cause de l'interdiction des liquides dans les bagages à main des passagers des avions. Des matrices de nanotubes à base d'oxyde de titane peuvent être utilisées pour détecter le TATP. En effet, les molécules de l'explosif s'accrochent aux nanotubes en formant des complexes qui modifient un courant électrique traversant ces matrices. Ces capteurs peuvent être intégrés à des appareils portatifs miniaturisés ;

- détection de substances chimiques : les nanotechnologies permettent par ailleurs de réaliser des « nez électroniques » capables de détecter des substances chimiques dangereuses. Ils sont constitués d'un bras vibrant, comme celui du microscope à force atomique, sur lequel on a déposé une couche spécifique capable de fixer les molécules de la substance à détecter. Celles-ci, en se posant sur le bras vibrant, l'alourdissent et modifient sa fréquence de résonance, ce qui rend possible la détection de la substance chimique recherchée ;

- détection des virus : aujourd'hui, du fait de l'augmentation des flux de voyageurs, les virus circulent plus librement et ils risquent de propager des épidémies dangereuses. Des personnes mal intentionnées peuvent également, grâce aux progrès de la biologie moléculaire, fabriquer en laboratoire des virus dangereux et les disséminer dans la nature à des fins criminelles ou terroristes. Les virus peuvent être détectés à l'aide de capteurs constitués d'une couche d'or d'épaisseur nanométrique, sur laquelle on accroche des anticorps spécifiques. Un faisceau laser, qui est réfléchi par la couche d'or, se trouve modifié quand des virus se lient avec les anticorps présents à la surface de cette couche réfléchissante (voir la photo 17) ;



**Photo 17 :** Détection de virus : le faisceau laser, se réfléchissant sur la couche d'or, se trouve modifié quand les virus se lient avec les anticorps. La présence des virus modifie le milieu optique où se propagent les plasmons de surface (ondes formées à l'interface métal-isolant).



**Photo 18** : Nano-codes-barres à nano-bâtonnets contenant une succession de six tranches à deux métaux différents (© Nanoplex Technologies)

- identification de personnes : les empreintes digitales étaient déjà utilisées comme signature par les Babyloniens il y a quatre mille ans, mais ce n'est qu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle que la police, à Londres, commence à les utiliser pour identifier les criminels. Les technologies numériques permettent aujourd'hui d'identifier automatiquement un individu parmi plusieurs millions à partir de douze points caractéristiques choisis sur la centaine de points qui caractérisent la texture de son empreinte digitale. Le dessin de l'iris, l'irrigation sanguine de la rétine, le réseau veineux de la main peuvent également être utilisés comme éléments biométriques. Des nanoparticules fluorescentes à base d'oxyde de zinc permettent de rendre visibles des traces d'empreintes digitales, même sur des surfaces humides ;
- lutte contre la contrefaçon : on peut marquer un produit de manière unique et pratiquement infalsifiable en disséminant des nanoparticules magnétiques de manière aléatoire à un endroit déterminé de sa surface. À l'aide d'un scanner magnétique semblable à la tête de lecture d'un disque dur, on lit ce code-barres magnétique et on identifie le produit. Un faussaire devrait reconstituer la configuration exacte des nanoparticules magnétiques, ce qui serait très difficile et coûteux. Une autre possibilité serait de fabriquer des nano-codes-barres à l'aide de nano-bâtonnets, chacun contenant une succession de tranches de métaux différents comme l'or, l'argent ou le platine. Avec trois métaux, un nano-bâtonnet à cinq tranches engendre 135 codes. En mélangeant plusieurs types de nano-bâtonnets, on obtient donc une combinatoire d'une richesse impressionnante (voir la photo 18).

## RISQUES POTENTIELS

Comme toute technologie nouvelle, les nanotechnologies soulèvent optimisme et enthousiasme, mais aussi inquiétude et méfiance. Des romans de science-fiction expriment ces dernières de façon angoissante. Ainsi, Éric Drexler, dans *Engines of Creation*, paru en 1986, évoque la menace du « gray goo », une gelée grise constituée de nanorobots capables de s'auto-répliquer en consommant la matière vivante de la planète. Michael Crichton, l'auteur du scénario du film *Jurassic Park*, a repris cette idée dans son roman *La proie* (*Prey*)

paru en 2002 : un essaim volant de nanoparticules intelligentes menace la vie sur la Terre.

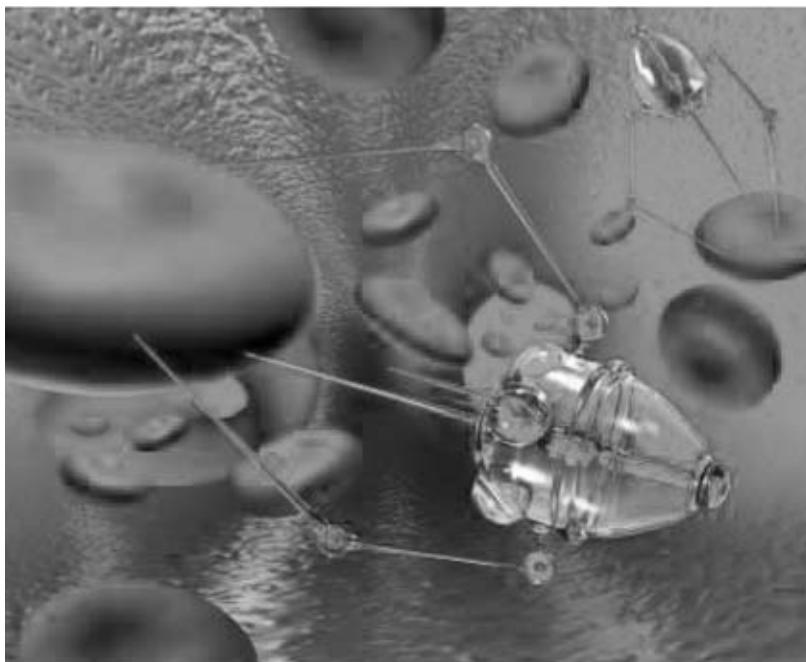
Dans la vision d'Eric Drexler, les « assembleurs moléculaires » sont des dispositifs capables de positionner un atome ou une molécule avec une grande précision et de construire ainsi, atome par atome (ou molécule par molécule), des édifices complexes, que l'on peut appeler nano-machines. Ces « assembleurs moléculaires » peuvent s'auto-répliquer ou fabriquer de nouveaux « assembleurs moléculaires », encore plus complexes (voir la photo 19).

Dans la pratique, ce processus est impossible : il faudrait d'abord initier le processus en construisant un assembleur moléculaire qui puisse démarrer une production en série de nanomachines. En outre, concevoir une nanomachine est difficile, car, malgré les progrès réalisés dans la simulation mathématique, il est pratiquement impossible de prédire le fonctionnement précis d'un assemblage complexe d'atomes. Sélectionner les réalisations réussies en écartant les échecs est pratiquement impossible par d'autres méthodes que celle spécifique à l'évolution darwinienne (la survie ou l'extinction), qui nécessiterait un temps très long. Enfin, construire une nanomachine atome par atome demanderait de casser et de former des liaisons chimiques entre des atomes ou des molécules déterminés tout en évitant les atomes et les molécules indésirables se trouvant dans le voisinage. Un tel processus reste très difficile à mettre en pratique car il se déroule dans un environnement instable, à cause de l'agitation thermique et des effets quantiques.

Les problèmes réels posés par les nanotechnologies sont plutôt d'ordres toxicologique et éthique.

Du fait de leur petite taille, les nanoparticules peuvent pénétrer dans l'organisme en franchissant les barrières naturelles (au niveau des poumons, de la muqueuse nasale, du tube digestif, voire de la peau). Elles ont une surface spécifique plus grande que les substances « macro », car plus la taille des particules diminue, plus leur surface de contact est grande. Enfin, ayant un nombre restreint d'atomes, elles présentent des défauts de surface qui leur confèrent une réactivité chimique accrue.

Lors de son évolution, l'homme a toujours vécu en contact avec des nanoparticules naturelles, comme les cendres d'éruptions volcaniques, les fumées des feux de forêt, les aérosols transportés par le vent ou le pollen



**Photo 19 :** Nano-robot réparant les cellules du corps humain, imaginé par des auteurs de romans de science-fiction (©www.techtoggle.com).

produit par les plantes. Mais ce n'est que depuis récemment qu'il est en contact avec des nanoparticules manufacturées, ce qui pose pertinemment la question de leur impact sur sa santé. C'est pourquoi plusieurs projets de recherche ont été lancés sur le thème de la toxicité potentielle des nanoparticules.

Ces études posent de grands défis car la réponse de l'organisme dépend de chaque nanoparticule et il est difficile de tirer des conclusions générales pour des classes plus larges. De plus, certaines nanoparticules non toxiques peuvent piéger, à leur surface, des molécules toxiques et pénétrer dans l'organisme : cet effet est appelé «cheval de Troie».

Au-delà de l'impact sur la santé se pose la question du devenir des nanoparticules disséminées dans la nature, de leurs interactions avec les plantes et les animaux et de leur transport dans l'environnement.

Enfin, les nanotechnologies soulèvent des problèmes éthiques. Manipuler des cellules souches ou remplacer des organes défaillants de l'organisme humain peut conduire à des dérapages, en particulier à des travaux visant à améliorer l'être humain ou à augmenter artificiellement ses capacités.

#### ACCEPTABILITÉ SOCIALE

Ces perspectives suscitent des inquiétudes, d'autant plus que les objets nanométriques, invisibles à l'œil nu, ne sont pas perceptibles directement. Certaines expériences malheureuses comme l'utilisation de l'amiante dans la construction, longtemps présenté comme un matériau miracle (isolant électrique, résistant au feu et à l'agression chimique) alors qu'il est toxique, ont rendu le grand public plus anxieux face aux risques potentiels. Une mesure radicale consisterait à abandonner la recherche en nanotechnologies. Cela nous protégerait

certaines des risques potentiels, mais nous priverait en même temps des retombées positives de cette recherche. Il appartient à la société de peser les bénéfices et les risques et de décider de poursuivre ou d'abandonner cette voie de recherche et de développement. Par un accord international, l'ensemble des pays pourrait décider d'abandonner la recherche en nanotechnologies et choisir d'explorer d'autres voies.

Plus raisonnablement, plusieurs actions sont envisageables : mettre au point des protocoles d'évaluation toxicologique et éco-toxicologique, avec des tests de laboratoire *in vitro* et sur animal, des règles de bon usage dans la production des nanoparticules, des systèmes de surveillance sanitaire des personnes exposées, des règlements de traçabilité des produits nano, des moyens pour que les consommateurs soient informés en toute transparence, des comités d'éthique pour s'interroger sur l'opportunité de développer les nanotechnologies.

Ces problèmes, qui relèvent plus de décisions politiques que de choix scientifiques et techniques, ne sont d'ailleurs pas spécifiques aux nanotechnologies. Il y a un espace de liberté et un espace de contraintes : ce que nous réaliserons ne dépend que de nous.

Pour assumer ses décisions et juger les choix technologiques, le citoyen doit avoir une culture scientifique. Comment comprendre le monde d'aujourd'hui sans un minimum de compréhension de la science ? Comment ne pas se sentir perdu, impuissant, frustré, quand on ne se représente pas du tout la façon dont fonctionne un circuit électrique ? Aujourd'hui, seuls quelques cerveaux privilégiés ont accès à la compréhension de la réalité, alors que le plaisir de faire un pas de plus vers le réel inaccessible est un des plus merveilleux. Il est urgent de transformer l'enseignement des sciences. L'école doit apporter à chacun, quelque soient ses possibilités intellectuelles apparentes, les moyens d'être un peu moins myope face au réel.