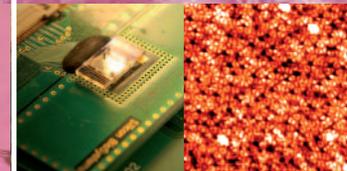


- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le Soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde



DE LA RECHERCHE  
À L'INDUSTRIE

# 18 → Le nanomonde



PLONGÉE DANS LE NANOMONDE  
TECHNOLOGIES POUR L'INFORMATION  
ET LA COMMUNICATION  
NANOMATÉRIAUX  
UNE MÉDECINE À L'ÉCHELLE NANO  
POUR UN DÉVELOPPEMENT CITOYEN



© Commissariat à l'énergie atomique, 2008  
Direction de la communication  
Bâtiment siège  
91191 Gif-sur-Yvette – [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

ISSN 1637-5408.



# Le nanomonde

<b>PLONGÉE DANS LE NANOMONDE</b>	<b>4</b>
<i>Top-down et bottom-up</i>	5
Des outils très fins et précis	6

<b>TECHNOLOGIES POUR L'INFORMATION ET LA COMMUNICATION</b>	<b>9</b>
--	----------

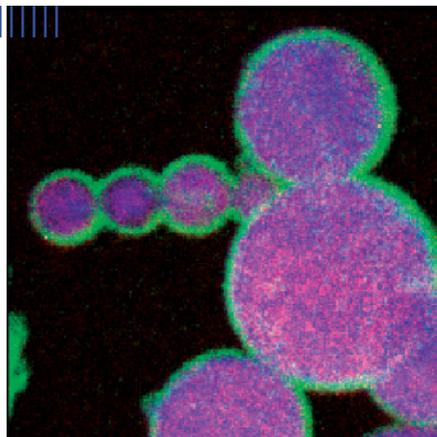
L'évolution de la microélectronique	10
Comment repousser les limites de la loi de Moore?	12

La démarche <i>bottom-up</i> à partir de nanocomposants	13
---	----

<b>NANOMATÉRIAUX</b>	<b>16</b>
Influence de la structure	17
Des nanos au service de l'énergie	19

<b>UNE MÉDECINE À L'ÉCHELLE NANO</b>	<b>21</b>
Un diagnostic plus rapide	22
Des traitements plus efficaces	24
Autres innovations	26

<b>POUR UN DÉVELOPPEMENT CITOYEN</b>	<b>27</b>
Des applications dans tous les domaines	28
Risques potentiels	29
Questions éthiques	30



Cartographie chimique de nanoparticules magnétiques.

© P. Bayle-Guilleraud/CEA

Conception et réalisation:  SPECIFIQUE - [www.specifique.fr](http://www.specifique.fr) - Photo de couverture: images de nanofils de silicium obtenues par microscopie électronique à balayage. © P. Gentile/CEA - Frise de la couverture: D. Vinçon/CEA - P. Stroppa/CEA - Illustrations: Yuvanoé - Impression: Imprimerie Euroland - 05/2008

© A. Genin - P. Stroppa - P. Dumas/CEA



Membranes pour piles à combustible, nanocomposants pour l'électronique et criblage moléculaire sont trois exemples d'applications parmi d'autres en liaison avec le quotidien.

“Associant les compétences des chercheurs en chimie, physique et biologie, plusieurs voies prometteuses s'ouvrent à la science.”

## À l'échelle du nanomètre

Depuis quelques dizaines d'années, les recherches s'orientent vers l'infiniment petit : le nanomonde. Le nanomètre représente un milliardième de mètre, 50 000 fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu ! C'est ce qui permet de nous rapprocher de la taille d'un atome : 0,1 nm. Dans la nature, cette échelle est courante : au niveau des assemblages d'atomes pour former des molécules, des protéines, et au niveau de leurs interactions. On comprend mieux qu'à cette taille, il est tout à fait possible de manipuler la matière, atome par atome, de la fabriquer, d'améliorer ses propriétés chimiques, physiques ou électroniques.

Associant les compétences des chercheurs en chimie, physique et biologie, plusieurs voies prometteuses s'ouvrent à la science dans l'univers des matériaux, de l'électronique ou de la médecine. Le résultat est déjà visible à travers trois exemples : les objets communicants, ces objets du quotidien dotés d'une interface de communication et de logiciel embarqué, les biopuces et les systèmes mécaniques miniatures. Ce nouveau champ de recherche est le premier à prendre en compte simultanément les développements technologiques et les répercussions sanitaires, environnementales et sociales. Cela devrait permettre d'anticiper les risques potentiels et de faire évoluer des réglementations spécifiques en fonction des progrès des connaissances et des recherches en cours.

L'ESSOR CONSTANT DE LA MINIATURISATION VA DE PAIR AVEC LA MISE AU POINT DE NOUVEAUX MICROSCOPES, OUVRANT LA VOIE AUX NANOSCIENCES ET AUX NANOTECHNOLOGIES.

# Plongée dans le nanomonde



“Selon la loi de Moore, d'ici à 2020, la taille des transistors devrait atteindre 10 nm, contre 100 nm aujourd'hui.”

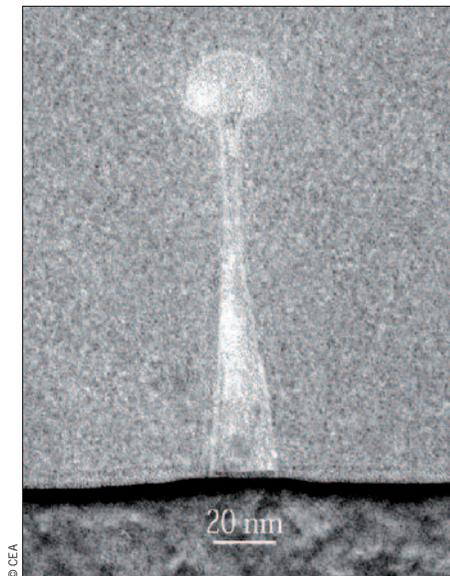
Les possibilités offertes par la miniaturisation avaient été perçues très en amont, dès 1959, par le physicien Richard Phillips Feynman. Celui-ci avait émis l'hypothèse que l'homme pouvait manipuler les atomes et les utiliser soit pour stocker de l'information, soit pour créer des systèmes fonctionnels. L'idée était là, mais pas les instruments permettant de vérifier cette hypothèse.

En appliquant à l'électronique une loi économique datant de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Gordon Moore, cofondateur d'Intel, estimait en 1965 que la cadence de miniaturisation des transistors intégrés sur une même puce suivait une pente régulière. En 1974, une puce contenait 4 transistors intégrés. Aujourd'hui, cette même puce en contient des dizaines de millions, chacun de la taille de 100 nm. En 2020, selon la courbe de cette « loi de Moore », les transistors devraient atteindre 10 nm !

Grâce à cette miniaturisation, les industriels fractionnent le cœur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant parallèlement, augmentant ainsi les fonctionnalités des processeurs.

## TOP - DOWN ET BOTTOM - UP

Cette volonté de miniaturisation est celle de la voie descendante, ou *top-down*. Le matériau est découpé, sculpté, gravé pour atteindre la dimension souhaitée, grâce à l'instrumentation élaborée et améliorée par l'homme, en vue d'atteindre le micromètre, puis le nanomètre.



Première mondiale : en 1999, un transistor MOS expérimental de 20 nanomètres est réalisé.

À l'inverse, la voie ascendante, ou *bottom-up*, permet d'assembler atome par atome des agrégats, puis des molécules, pour construire la matière. Cette voie est similaire à celle suivie par la Nature qui, à partir de molécules simples, a formé le monde du vivant durant les 4 milliards d'années d'évolution. L'étude du nanomonde englobe :

- les nanosciences, qui étudient la composition de la matière, son assemblage et ses propriétés

intimes à l'échelle du nanomètre ;

- les nanotechnologies, qui correspondent aux techniques et outils utilisés pour étudier ces nouvelles propriétés de la matière et pour réaliser de nouveaux dispositifs, objets et systèmes qui les exploitent.

### DES OUTILS TRÈS FINS ET PRÉCIS

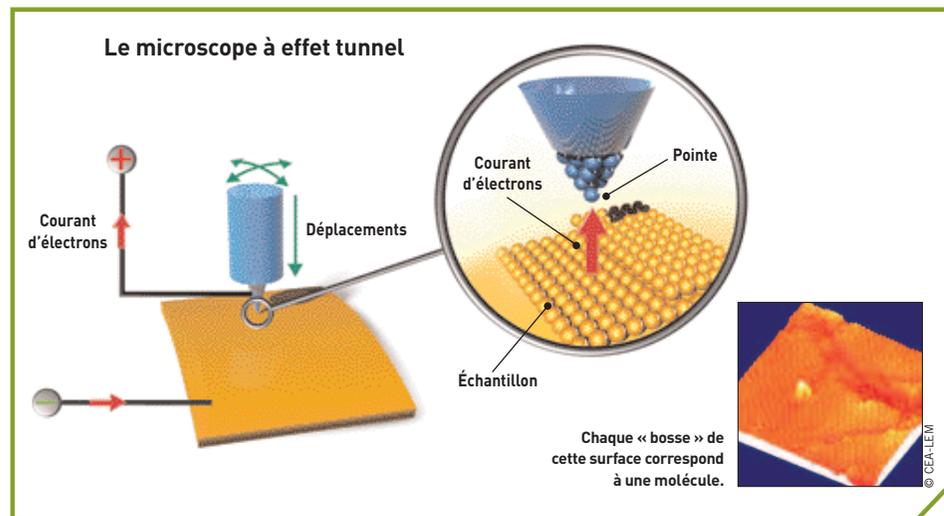
Pour manipuler des objets aussi petits, les outils doivent être très fins et précis.

Le microscope à effet tunnel est l'un des premiers instruments créés afin de « voir » les atomes à la surface de la matière. Cet instrument comporte une pointe métallique extrêmement fine qui permet de cartographier,

atome par atome, la surface d'un matériau. Il est uniquement utilisé pour l'observation de la surface des matériaux conducteurs.

Une tension électrique, créant un courant d'électrons, est exercée entre la pointe et la surface. La surface est donc balayée à une distance de quelques nanomètres, la pointe capture les électrons qui transitent grâce à l'effet tunnel. Les variations de ce « courant tunnel » sont enregistrées et traitées par un ordinateur fournissant une image du relief de la matière, atome par atome (*voir encadrés*).

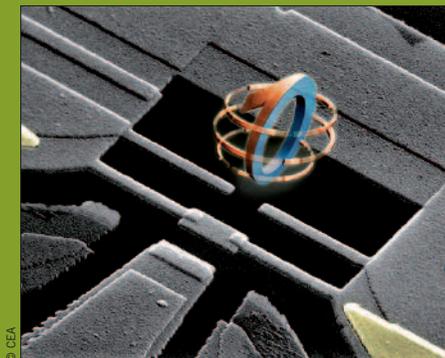
Ses inventeurs, les Suisses Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich, ont été couronnés par le prix



### LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Le monde nano est à l'interface du monde quantique et du monde macroscopique – on parle à son sujet de dimension mésoscopique. Ses lois sont parfois celles de la physique classique (basée sur les théories de Newton du début du XVIII<sup>e</sup> siècle) et parfois celles de la physique quantique. La physique quantique est apparue au XX<sup>e</sup> siècle. Elle doit son nom au principe du quanta de Planck, qui permet d'exprimer toute manifestation de l'énergie par une valeur « discrète », appelée aussi « quantum » (unité indivisible).

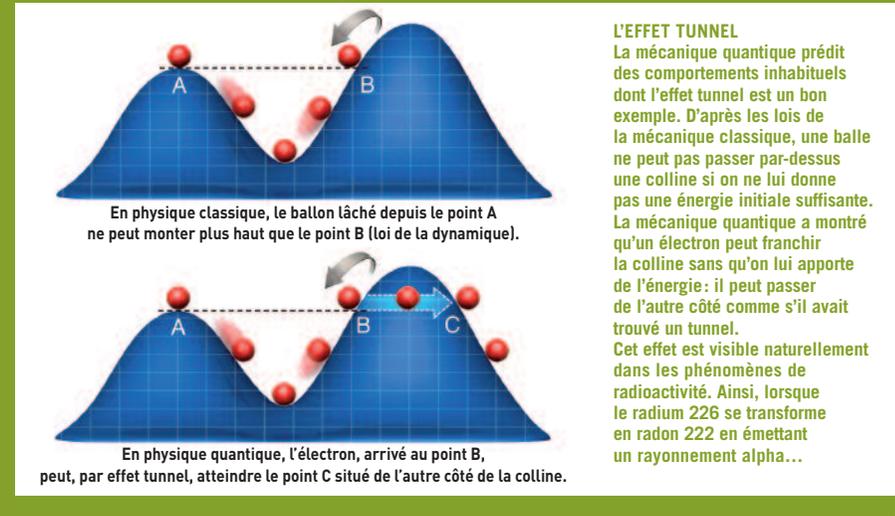
La physique quantique définit un monde « en escalier » où tout est quantifiable. Les atomes peuvent avoir plusieurs états, chacun associé à un niveau d'énergie différent. Le passage d'un état à l'autre ne peut se faire que si l'atome reçoit une quantité d'énergie précise et suffisante. Cette énergie peut venir de la lumière, sous forme de « paquets » de photons de longueurs d'onde différentes. En physique classique, il existe deux phénomènes distincts : la particule et l'onde. En physique quantique, ces deux phénomènes coexistent : l'électron



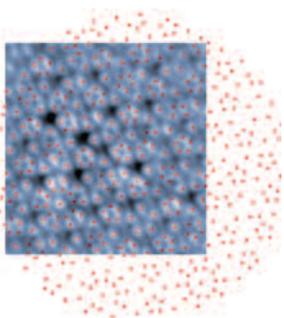
Quantonium : première réalisation d'un bit quantique sur une puce électronique.

n'est pas seulement une particule chargée électriquement mais également une onde, tout comme le photon, particule que l'on trouve

dans la lumière. En fonction du contexte, un électron peut donc se présenter soit sous forme de particule, soit sous forme d'onde.



© L. Barbier/CEA



Superposition d'images : la surface observée au microscope à effet tunnel s'accorde avec le modèle des seuls atomes d'aluminium la composant.

Nobel de physique en 1986.

Ce microscope permet aujourd'hui de déplacer chaque atome, comme un « pic à atome », en augmentant la tension électrique.

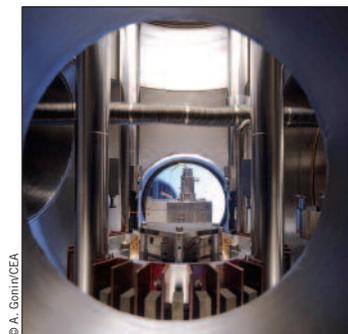
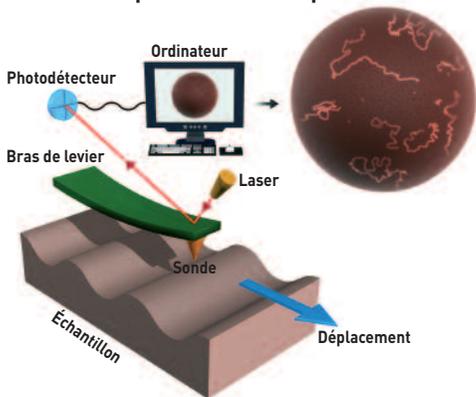
**Le microscope à force atomique** permet d'observer des matériaux non conducteurs, tels que les matériaux céramiques, polymères ou biologiques.

S'appuyant sur un dispositif semblable à celui qui équipait la tête de lecture des tourne-disques, il est 100 % mécanique. La pointe de ce microscope est fixée sur un bras de levier flexible, qui est en interaction avec la

surface du matériau. Elle balaye la surface en suivant à très faible distance le relief. La déformation du levier, éclairé par un laser, est mesurée par un photodétecteur et enregistrée sur un ordinateur.

Dans un grand nombre d'expériences, les chercheurs ont recours à la puissance de calcul des supercalculateurs pour modéliser l'assemblage atomique et restituer ses propriétés propres. L'objectif est d'augmenter les connaissances en sciences de la matière ou du vivant et de constituer en amont des assemblages inédits ou de contrôler certaines propriétés.

**Le microscope à force atomique**

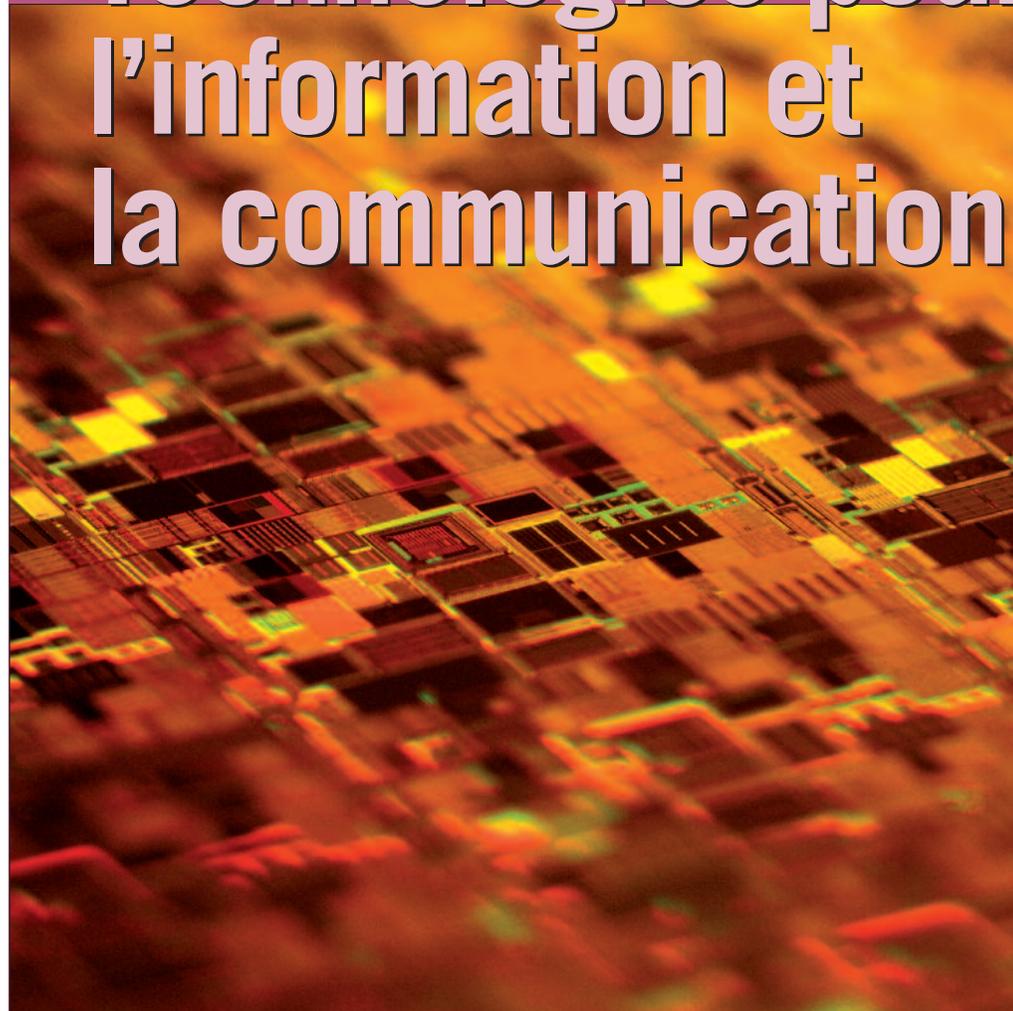


© A. Comin/CEA

Vue, à travers un hublot, d'un microscope à force atomique [AFM] fonctionnant sous ultraviolette.

SPINTRONIQUE, PHOTONIQUE, ÉLECTRONIQUE MOLÉCULAIRE... AUTANT DE TECHNOLOGIES À L'ÉTUDE POUR MINIATURISER DAVANTAGE LES TRANSISTORS.

# Technologies pour l'information et la communication



© P. Stroppa/CEA

Les technologies pour l'information et la communication recourent comme matériau de base aux nanocomposants. Ceux-ci sont fabriqués de deux manières (voir page 5).

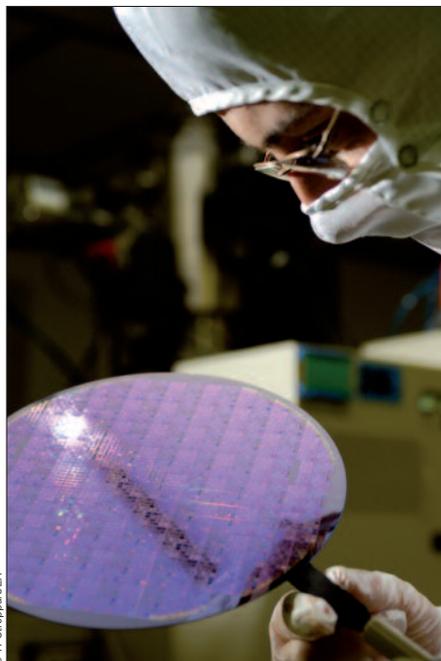
La voie descendante, ou *top-down*, permet de réduire le plus possible les dimensions du composant que l'on veut fabriquer. C'est la voie suivie par l'électronique depuis quarante ans. L'exemple le plus remarquable en est le circuit intégré sur puce.

La voie ascendante, ou *bottom-up*, permet de construire des molécules ou des assemblages atomiques complexes, intégrés ensuite dans de plus grands systèmes. Elle vise à fabriquer plus petit, moins cher et avec une qualité accrue. C'est l'une des voies d'avenir à plus ou moins long terme pour dépasser les limitations de la loi de Moore.

## L'ÉVOLUTION DE LA MICROÉLECTRONIQUE

Le silicium, matériau de base de toute l'industrie électronique, est un élément abondant, puisqu'il est extrait du sable par purification (94 % de la croûte terrestre est composée de silice!). Il est cristallisé sous la forme de barreaux de 20 à 30 cm de diamètre, lesquels seront découpés en tranches de moins d'un millimètre d'épaisseur. Sur ces tranches sont fabriquées en même temps des centaines de puces, par photolithographie. Celle-ci consiste à reproduire, dans une résine photosensible, le dessin des circuits à réaliser, à l'image de pochoirs que l'on pourrait superposer pour obtenir des circuits de plus en plus complexes. Ces motifs compliqués sont

générés en une seule exposition. Les détails sont imprimés sur le substrat quand la lumière passe à travers les ouvertures d'un masque, définissant d'une manière précise et reproductible des millions de transistors. Les traits les plus fins obtenus aujourd'hui industriellement ont une épaisseur de 45 nanomètres, ce qui permet de disposer et de connecter des millions de composants de base – les transistors – par circuit et de multiplier ainsi



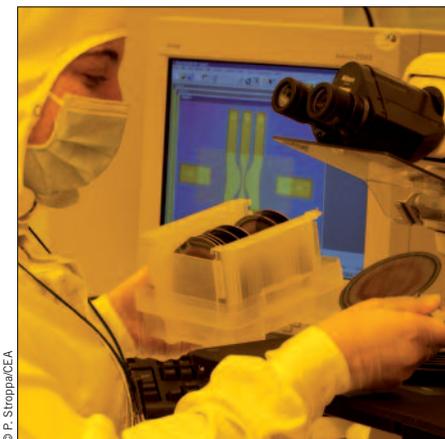
© F. Stroppa/CEA

Une plaque de silicium 200 mm contenant des circuits électriques.

les fonctionnalités. Cette technique de photolithographie est limitée par les phénomènes de diffraction et de longueur d'onde du faisceau de lumière utilisé. Des améliorations sont en cours de test pour augmenter la précision. Par exemple, la longueur d'onde des lumières utilisées à travers les pochoirs a été diminuée pour descendre du bleu au bleu profond puis à l'ultraviolet. Mais de nouvelles lentilles doivent être mises au point pour focaliser cette lumière de plus en plus énergétique. La résolution spatiale a été doublée en tirant parti du caractère ondulatoire de la lumière et du principe d'interférence. Le renforcement sélectif des ondes lumineuses mène à une exposition accrue

On parle d'interférence lorsque deux ondes de même type se rencontrent.

de la résine photosensible, tandis que leur annulation laisse des structures dans l'obscurité. On peut également graver des motifs sur les puces au moyen de faisceaux d'électrons, mais les dessins doivent alors être tracés les uns après les autres. La lithographie à faisceau d'électrons (e-beam) permet d'atteindre une résolution nanométrique, car la longueur d'onde des électrons est de l'ordre de quelques nanomètres. C'est idéal pour produire le pochoir initial qui sera réutilisé des milliers de fois en lithographie optique, ou pour la fabrication de circuits expérimentaux en laboratoire... mais pas pour la production en masse de puces. La photolithographie atteindra ses limites techniques lorsque les détails les plus fins mesureront de 10 à 20 nm, ce qui devrait arriver à l'horizon de 2015. À cette échelle,



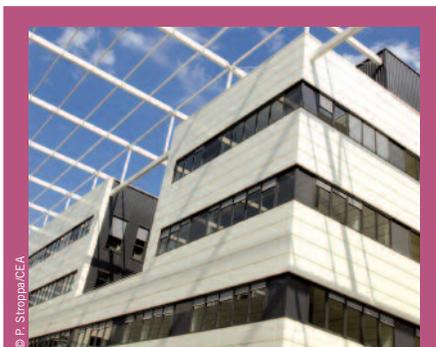
© P. Stroppa/CEA

Observation des motifs gravés grâce à un microscope optique.

des effets dus à la physique quantique se manifesteront et perturberont le fonctionnement des circuits; par exemple, des électrons pourront sauter d'un « fil » à l'autre par effet tunnel (voir encadré page 7).

Outre les limites physiques, les investissements nécessaires pour construire des usines capables de graver des circuits aussi fins deviendront prohibitifs (estimés aujourd'hui à plus de 5 milliards d'euros). La voie *top-down*, qui aura poussé jusqu'à l'extrême la miniaturisation du transistor MOS (*Metal oxide semiconductor*), devrait atteindre ses limites vers 2020.

Un changement de technologie devrait alors s'imposer: ce sera le début de la véritable nanoélectronique, qui prendra en compte les propriétés de la matière à cette échelle. Les composants de base ne seront plus les mêmes.



© P. Stoppa/CEA

## MINATEC

Pôle d'excellence européen en micro et nanotechnologies. Autour de l'Institut Léti\* du CEA est organisé un campus regroupant institutions universitaires et entreprises privées. Officiellement inauguré en juin 2006 et situé à Grenoble, Minatec met à leur disposition des salles blanches et une plateforme de nanocaractérisation unique en Europe, pour un investissement d'un milliard d'euros sur dix ans.

\*Laboratoire d'électronique et des technologies de l'information.

## COMMENT REPOUSSER LES LIMITES DE LA LOI DE MOORE ?

Plusieurs options sont possibles pour prolonger la voie de la miniaturisation, dont voici deux exemples.

**La spintronique réalise le mariage entre l'électronique et le magnétisme.** Alors que l'électronique actuelle est entièrement basée sur la manipulation de la charge électrique portée par les électrons, la spintronique utilise leur **spin**. Les électrons ont trois particularités physiques : leur masse, leur charge et leur spin. Pour cette dernière caractéristique intrinsèque, tout se passe comme si le moment magnétique de l'électron s'apparentait au sens de rotation interne de celui-ci autour d'un axe fixe imaginaire. Pour les électrons, le spin ne peut prendre que deux valeurs :  $+1/2$  spin dit « up » ou  $-1/2$  spin dit

Moment magnétique de l'électron

« down », correspondant ainsi au fait qu'il ne peut tourner que dans un sens ou dans l'autre. On peut utiliser cette propriété pour obtenir des fonctionnalités nouvelles, par exemple pour coder, traiter ou transmettre une information.

Une grande variété de dispositifs innovants utilisant le spin des électrons peut être réalisée. Ces dispositifs combinent des matériaux magnétiques qui servent de polariseur ou analyseur en spin et des matériaux conducteurs, isolants ou semiconducteurs.

Des dispositifs spintroniques sont déjà utilisés dans les disques durs d'ordinateur. Il s'agit de capteurs dont la résistance électrique varie en fonction du champ magnétique appliqué. Ils permettent de relire l'information magnétique enregistrée sur le disque magnétique. La spintronique permet d'envisager de pousser la capacité de stockage sur les disques durs au-delà du téraoctet ( $10^{15}$  bits) par pouce carré, c'est-à-dire 155 milliards de bits/cm<sup>2</sup>.

D'autres applications industrielles sont en train de voir le jour. Ainsi, des mémoires magnétiques peuvent être réalisées sans aucune pièce mobile (contrairement aux disques durs). Ces mémoires sont formées d'un réseau de piliers magnétiques de dimension nanométrique, eux-mêmes constitués de couches magnétiques dont le sens de l'aimantation ( $+1/2$  ou  $-1/2$ ) détermine l'état du bit (respectivement 0 ou 1). Non seulement ces mémoires vives ne disparaissent pas en cas de coupure d'alimentation (non-volatilité), mais elles sont très rapides (écriture et lecture ne durent que quelques nanosecondes) et sont

## “Des mémoires vives persistantes et rapides grâce à la spintronique.”

insensibles aux rayonnements ionisants. Elles permettent de concevoir des ordinateurs que l'on pourrait éteindre et allumer instantanément en gardant toute l'information à l'écran. D'autres applications sont en cours de développement pour la réalisation de composants radiofréquence pour les télécommunications et les réseaux sans fil.

**La photonique utilise la lumière pour coder l'information.** Tous les systèmes actuels (une puce d'ordinateur, un circuit intégré, un transistor) sont basés sur le transport, le confinement et les propriétés physiques de l'électron. Mais si, pour aller plus vite, il était remplacé par le photon ? Celui-ci, outre qu'il se déplace à la vitesse de la lumière (300 000 km/s), provoque peu de dissipation de chaleur lors de son déplacement.

Mais, avant d'employer les photons comme moyen de codage d'information dans une puce, il faut mettre au point tous les composants de la chaîne, de l'émetteur au récepteur, en passant par les guides et les modulateurs. Le silicium, vedette

de la microélectronique, est une piètre source de lumière... à l'état macroscopique. La solution est venue de la nanostructuration : soumis aux lois étranges du monde quantique, un cristal de silicium, réduit à une dizaine de nanomètres, voit ses performances d'émission fortement modifiées ! Pour guider ces photons, pas question d'utiliser des fibres optiques ou des miroirs aux dimensions millimétriques, mais un dispositif bien plus efficace : le cristal photonique. Constitués en perçant de minuscules trous de manière périodique dans un semi-conducteur, ces cristaux réfléchissent et dirigent la lumière. Ils peuvent aussi la filtrer, en agissant sur des longueurs d'onde particulières et permettent de la confiner dans un volume extrêmement faible (quelques centaines de nm). **La modulation, le multiplexage**

- **Modulation :** codage des signaux optiques par l'information à transmettre.
- **Multiplexage :** division d'une voie de transmission commune en plusieurs voies distinctes pouvant transmettre simultanément des signaux indépendants dans le même sens.

et le décodage des signaux sont les trois domaines où de nombreux progrès sont en cours pour aller vers l'ordinateur à photons.

C'est cette possibilité de multiplexage qui, en permettant les calculs parallèles, représente le « plus » de l'ordinateur photonique.

## LA DÉMARCHÉ BOTTOM-UP À PARTIR DE NANOCOMPOSANTS

Cette nouvelle approche est envisageable pour surmonter les obstacles de la miniaturisation. Elle fait appel à des connaissances fondamentales



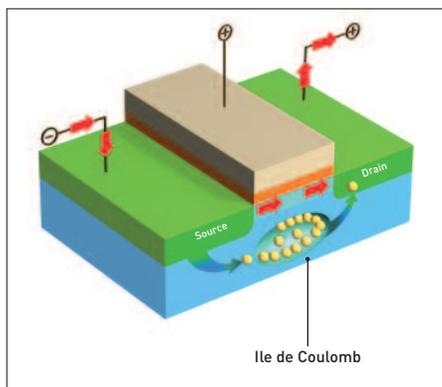
© Artechhouse/CEA

Banc de mesure de composants spintroniques

## “Le photon, qui se déplace à la vitesse de la lumière, pourrait remplacer l'électron pour coder les informations dans une puce.”

de physique et de chimie et permet de concevoir les composants entièrement nouveaux de l'électronique moléculaire.

Si la fabrication atome par atome de nanocomposants est possible, elle est inenvisageable industriellement sans la maîtrise de procédés d'auto-assemblage de la matière, car elle prendrait un temps infini. À défaut de construire un circuit et ses nanocomposants, ce qui serait trop long et trop cher, les chercheurs envisagent la conception d'entités moléculaires dotées de fonctions électroniques capables de s'organiser seules. Pour les fabriquer, ils disposent de quatre briques de base : les molécules de synthèse, faciles à obtenir, les biomolécules comme l'ADN, les nanoparticules métalliques ou semi-conductrices et



Lorsque l'on applique une tension déterminée sur la grille, un électron peut entrer dans « l'île de Coulomb » tandis qu'un autre en sort. Il s'établit dans le transistor un courant dont l'intensité dépend du nombre d'électrons présents dans l'île.

les nanotubes de carbone. Mais la voie de l'auto-assemblage est difficile : il faut réussir à contrôler le positionnement des briques.

Des charges positives et négatives s'attirent : si l'on ajoute des molécules chargées négativement à la surface d'un wafer, elles vont attirer les molécules chargées positivement greffées à la surface

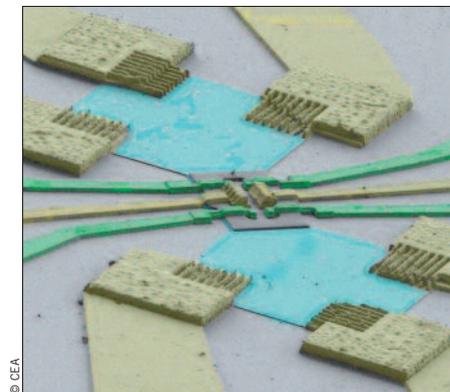
Galette ultrafine, le plus souvent de silicium, où sont gravés les composants.

de nanotubes, créant ainsi des nanocomposants. Reste à résoudre le problème des jonctions entre ces composants et le reste du circuit ; faute de quoi, l'électronique moléculaire en restera là, malgré des perspectives très séduisantes.

En 1974, la première diode moléculaire a été réalisée sur une couche de molécules individuelles. Non plus faite en silicium, elle a été obtenue par la mise en contact de deux morceaux de semi-conducteurs : l'un des matériaux comporte de nombreux électrons, alors que le deuxième en est extrêmement pauvre. Des molécules qui présentent cette même asymétrie ont ensuite été conçues ; puis un transistor dans lequel le canal était formé d'une de ces molécules.

Ce dispositif a donné des preuves flagrantes du comportement quantique des électrons. On peut aussi concevoir un transistor à un seul électron. Le principe consiste à ajouter un espace en matériau semi-conducteur entre la source et le drain du transistor, où seul un nombre déterminé d'électrons peut s'accumuler. Quand une tension électrique est appli-

quée entre la source et le drain, l'espace se remplit, puis le courant ne passe plus (phénomène de blocage de Coulomb). Lorsque l'on applique une tension sur la grille du transistor, un nouvel électron peut entrer, tandis qu'un autre sort de cet espace. Ainsi, en modifiant la tension de grille, on réalise de l'électronique à un seul électron.

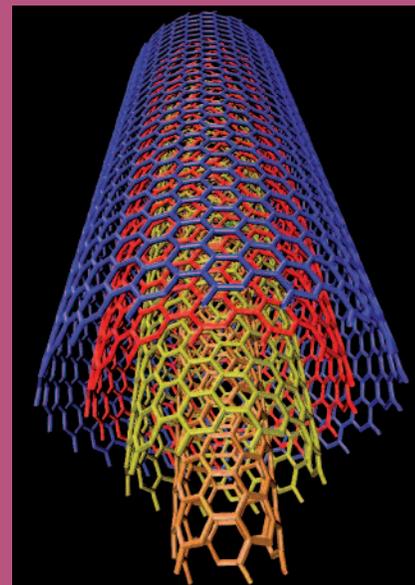


Un circuit d'expérimentation en électronique quantique.

## GRAPHÈNE ET NANOTUBE DE CARBONE

En chimie et en science des matériaux, l'allotropie est la propriété de certains corps simples d'exister sous plusieurs formes cristallines ou moléculaires. Par exemple le carbone, qui apparaît sous une forme non structurée : la mine de crayon, ou structurée : le diamant. La mine de crayon est composée d'un empilement de feuillets monoatomiques d'atomes de carbone disposés en hexagones. Si l'on isole un seul feuillet de la structure, on obtient du graphène, qui présente des propriétés de transport électronique remarquables. Si l'on enroule ce feuillet sur lui-même, il peut prendre la forme d'un nanotube. Le nanotube a des propriétés mécaniques et électriques surprenantes qui promettent des applications nombreuses et une industrialisation dans un avenir proche :

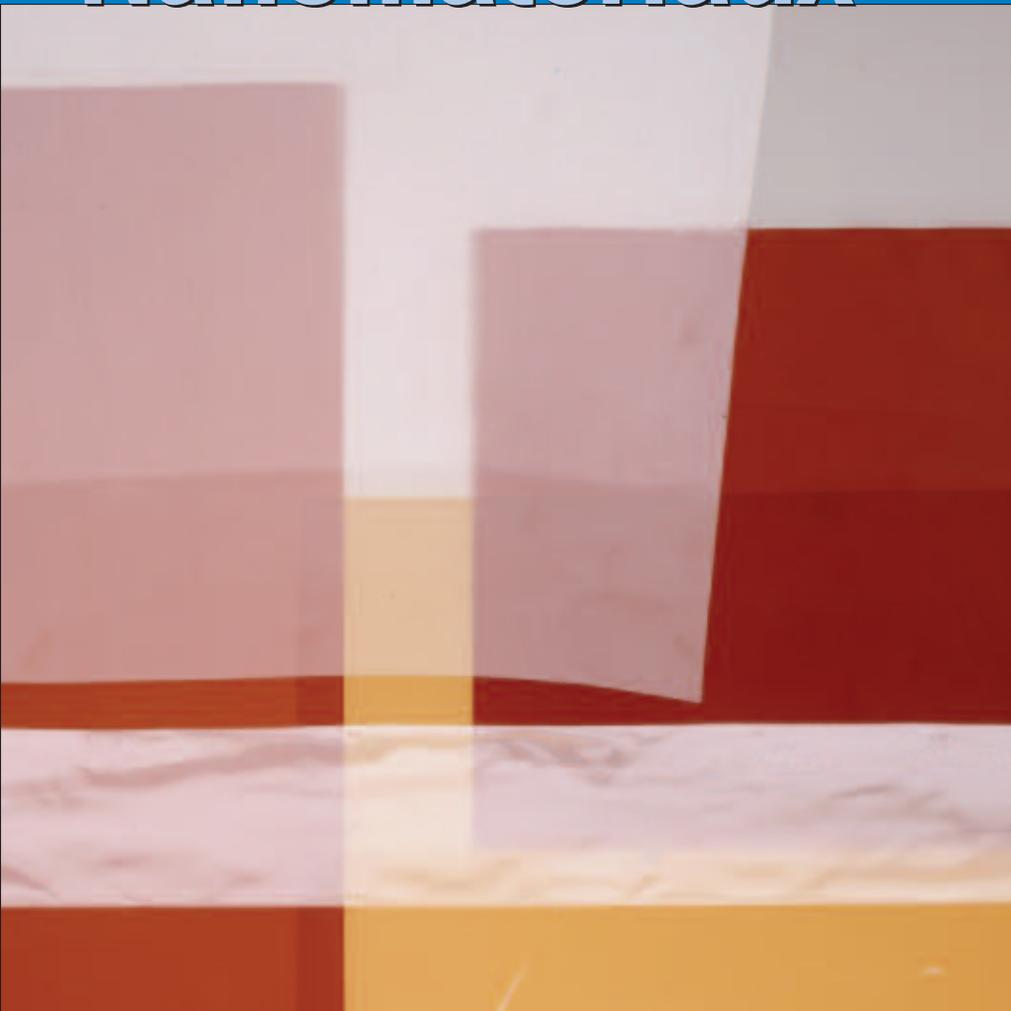
- le nanotube est 100 fois plus résistant et 6 fois plus léger que l'acier. Il peut donc être utilisé pour fabriquer des matériaux composites hautes performances et remplacer les traditionnelles fibres de carbone : raquettes de tennis ou clubs de golf sont des exemples d'applications grand public.
- en fonction de l'angle d'enroulement du feuillet de graphène, le nanotube est soit un excellent conducteur d'électricité, soit un semi-conducteur. Les conducteurs pourront être utilisés dans la fabrication de nanofils électriques, ou comme nano-électrodes dans les écrans plats de télévision ou d'ordinateur. Un nanotube semi-conducteur et un conducteur assemblés pourront être utilisés comme éléments de base pour fabriquer des composants électroniques nanométriques.



Nanotube de carbone multifeuillet.

CONSTRUIRE DES NANOMATÉRIAUX AUX PROPRIÉTÉS NOUVELLES POUR L'ÉNERGIE, LES TRANSPORTS ET D'AUTRES APPLICATIONS DE LA VIE QUOTIDIENNE.

# Nanomatériaux



© A. Genin/CEA

L'observation des matériaux au microscope fait apparaître leur composition, leur structure, granulaire ou fibreuse, et leurs défauts. Elle révèle, par exemple, que les alliages métalliques sont constitués d'agrégats de grains de taille micrométrique.

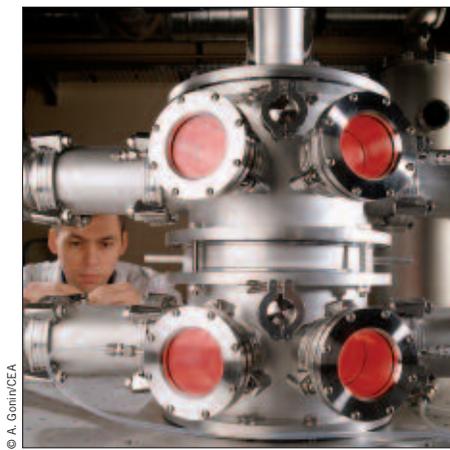
## INFLUENCE DE LA STRUCTURE

La structure détermine les propriétés optiques, mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques... des matériaux. En faisant coïncider l'échelle d'homogénéité des matériaux avec l'échelle d'action de phénomènes physiques, on peut modifier certaines de leurs caractéristiques. Ainsi, un verre millistructuré est transparent mais pas superhydrophobe, tandis qu'un verre microstructuré est opaque mais toujours pas superhydrophobe. Seul un verre nanostructuré est transparent et superhydrophobe.

Les nanomatériaux sont donc volontairement façonnés à cette échelle : ils sont constitués d'éléments nanométriques qui vont leur conférer la propriété recherchée. Ils peuvent se présenter sous forme de nanopoudre ou comprennent des nanoparticules intégrées dans une matrice ordinaire (on parle alors de matériaux composites).

En diminuant la taille des grains, on obtient des matériaux plus légers et ayant de meilleures propriétés mécaniques, par exemple plus résistants. Les matériaux obtenus sont plus malléables car les grains glissent plus facilement les uns par rapport aux autres.

Plus un objet est petit, plus sa surface externe est importante par rapport à son volume. Les objets nanométriques sont caractérisés par un nombre d'atomes en surface identique au nombre d'atomes en volume. Les phénomènes de surface jouent donc un rôle désormais prédominant. Le monde naturel l'illustre bien (*voir encadré page suivante*) : ainsi, un insecte peut marcher sur l'eau mais, grossi 500 fois jusqu'à la taille d'un éléphant, il n'en serait plus capable. De plus, ce qui se passe à l'interface entre chaque élément constitutif est aussi très important. Plus il y a d'éléments, plus la surface d'échange augmente. Celle des objets nanométriques est par conséquent immense.



© A. Genin/CEA

Réacteur de l'installation pilote de synthèse de nanopoudres par la méthode de pyrolyse laser en flux, en cours d'installation.

Il est ainsi possible de modifier les propriétés d'un matériau en le façonnant à cette échelle. Par exemple, le cuivre formé de nanocristaux est trois fois plus résistant mécaniquement qu'en microcristaux. Une poussière de nanotubes « en vrac » a une immense surface d'échange avec son environnement : plusieurs centaines de mètres carrés par gramme. Cela permet notamment d'augmenter l'efficacité des catalyseurs de l'industrie chimique ou des pots d'échappements pour le même volume de matière.

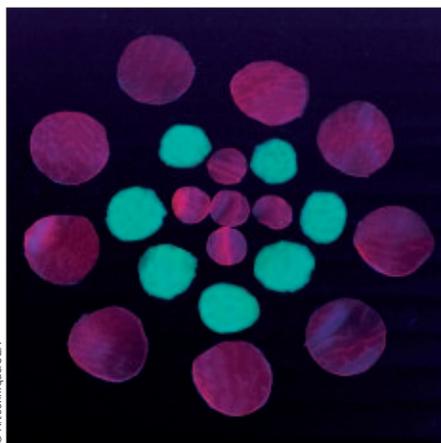
Certains matériaux réémettent de la lumière visible quand ils sont éclairés : c'est le phénomène de photoluminescence. Sous des rayons ultraviolets, la couleur émise par des

### LA NATURE INSPIRATRICE

**Le gecko, petit animal qui ressemble à un lézard, a la propriété étonnante de courir au plafond ! En examinant de très près la surface de ses pattes, on a découvert qu'elle est constituée d'un tapis de fibres très serrées qui lui donne cette superadhérence. Des chercheurs sont en train d'en copier la structure pour reproduire cet effet de nano-velcro...**

**La feuille de lotus, quant à elle, présente une propriété étonnante : elle est superhydrophobe. L'étude nanométrique de sa surface met en évidence une nanostructure qui fait glisser les gouttes, et permet de comprendre comment et pourquoi, même plongée dans l'eau, elle paraît toujours sèche. L'intérêt de cette recherche est de pouvoir fabriquer des verres hydrophobes qui pourraient équiper les véhicules et la lunetterie.**

nanocristaux de sélénium de cadmium change en fonction de leur dimension, passant du bleu pour des grains de 2 nm au vert pour 3 nm, puis au rouge pour 5 nm. Dotés de cette pro-



© Artechhouse/CEA

Les polymères sont transparents : ce sont les nanocristaux dispersés dans le polymère qui sont fluorescents sous lampe UV.

priété, les nanocristaux de semi-conducteurs, souvent appelés *quantum dots*, peuvent être utilisés dans le marquage moléculaire ou encore comme marqueurs d'objets précieux et de produits commerciaux.

On peut ainsi utiliser la réactivité ou les propriétés de certaines nanoparticules pour obtenir des surfaces fonctionnalisées : vitres autonettoyantes, miroirs antibuée, revêtements antibactériens et/ou fongicides... Pour cela, il faut déposer une couche de ces nanoparticules à

## “L'apport des nanomatériaux et des matériaux nanostructurés est stratégique dans le domaine de l'énergie nucléaire du futur.”

la surface d'un objet en matériau ordinaire avec des procédés comme le sol-gel ou le dépôt en phase vapeur.

Les objets nanométriques « naturels » sont depuis toujours présents dans notre environnement. Les grains d'argent des émulsions photographiques, la poudre à base d'encre de Chine, les colorants des verres (de certaines cathédrales par exemple) contiennent des nanoparticules. Mais les objets dérivant des nanotechnologies ne sont fabriqués que depuis quelques années. Aujourd'hui, plus de 350 produits grand public sont commercialisés pour lesquels le constructeur mentionne au moins un élément dérivé des nanotechnologies. Parmi eux, on compte des cosmétiques, des systèmes électroniques et des produits ménagers et sportifs.

Pour beaucoup d'applications, des nanoparticules aux propriétés déterminées sont incluses dans une matrice, créant ainsi un matériau composite fonctionnel. Tout, ou presque, est envisageable : béton ultraléger, résistant et auto-cicatrisant, film de polyéthylène antibactérien (en incluant des nanoparticules d'argent) et imperméable aux rayons UV (grâce à des nanoparticules de dioxyde de titane), crèmes solaires incorporant, elles aussi, des nanograins de dioxyde de titane pour l'absorption des UV dangereux pour la peau, céramiques nanorenforcées rendues biocompatibles, matières plastiques à base de polymères rendues conductrices, ininflammables ou plus résistantes...

### DES NANOS AU SERVICE DE L'ÉNERGIE

L'apport des nanomatériaux et des matériaux nanostructurés est stratégique dans le domaine de l'énergie nucléaire du futur, en particulier dans les projets liés aux réacteurs de « Génération IV ». En effet, qu'il s'agisse des nouveaux alliages métalliques renforcés par une dispersion très fine d'oxyde (aciers ODS) ou de composites à matrices céramiques (CMC), les performances de ces matériaux reposent sur leur nanostructuration. Elles permettent par exemple aux premiers de renforcer leur résis-



© CEA-Lévi

Écran vidéo à base de nanotubes de carbone réalisé en 2005. L'image affichée est extraite du film *La Ruée vers l'or de*

tance lors de leur utilisation en environnement sévère ; aux seconds de présenter une conductivité thermique élevée. Le développement pour le nucléaire de ces matériaux nanostructurés permettra la diffusion de connaissances, de savoir-faire technologique et d'innovation dans d'autres secteurs industriels.

Les nouvelles technologies de l'énergie intègrent aussi ces recherches.

Premier exemple : les cellules photovoltaïques. Les dispositifs actuels en silicium cristallin convertissent au maximum 16 à 18 % de la puissance du Soleil en énergie électrique, mais la fabrication des cellules est coûteuse, complexe, et exige de grandes précautions. Les nanotechnologistes élaborent des structures photosensibles flexibles, à partir de plastiques conducteurs, actuellement en phase de test. Pour les piles à combustible, le polymère des

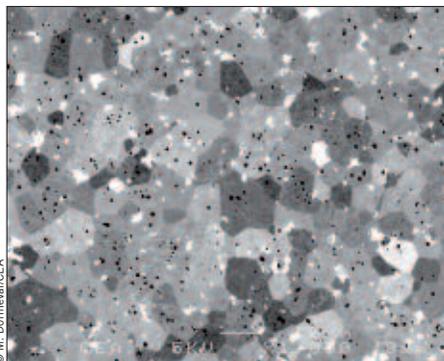


© C. Dupont/CEA

**Préparation des cellules solaires photovoltaïques souples à l'Institut national de l'énergie solaire.**

membranes a été rendu plus résistant mécaniquement, chimiquement et thermiquement. Les particules de platine, qui jouent le rôle de catalyseur, ont été remplacées par des nanoparticules, permettant ainsi d'économiser du métal précieux.

Le champ des possibles est immense. À l'évidence, des secteurs comme l'aéronautique et l'aérospatiale, toujours à la recherche de matériaux légers et ultra-performants, seront de gros utilisateurs. Les moyens de transport terrestres, maritimes et aériens seront plus légers, emporteront plus de charge utile tout en consommant moins d'énergie et donc en polluant moins. L'industrie textile connaîtra aussi sans doute des bouleversements : de nombreux scientifiques travaillent déjà sur des tissus « intelligents ».

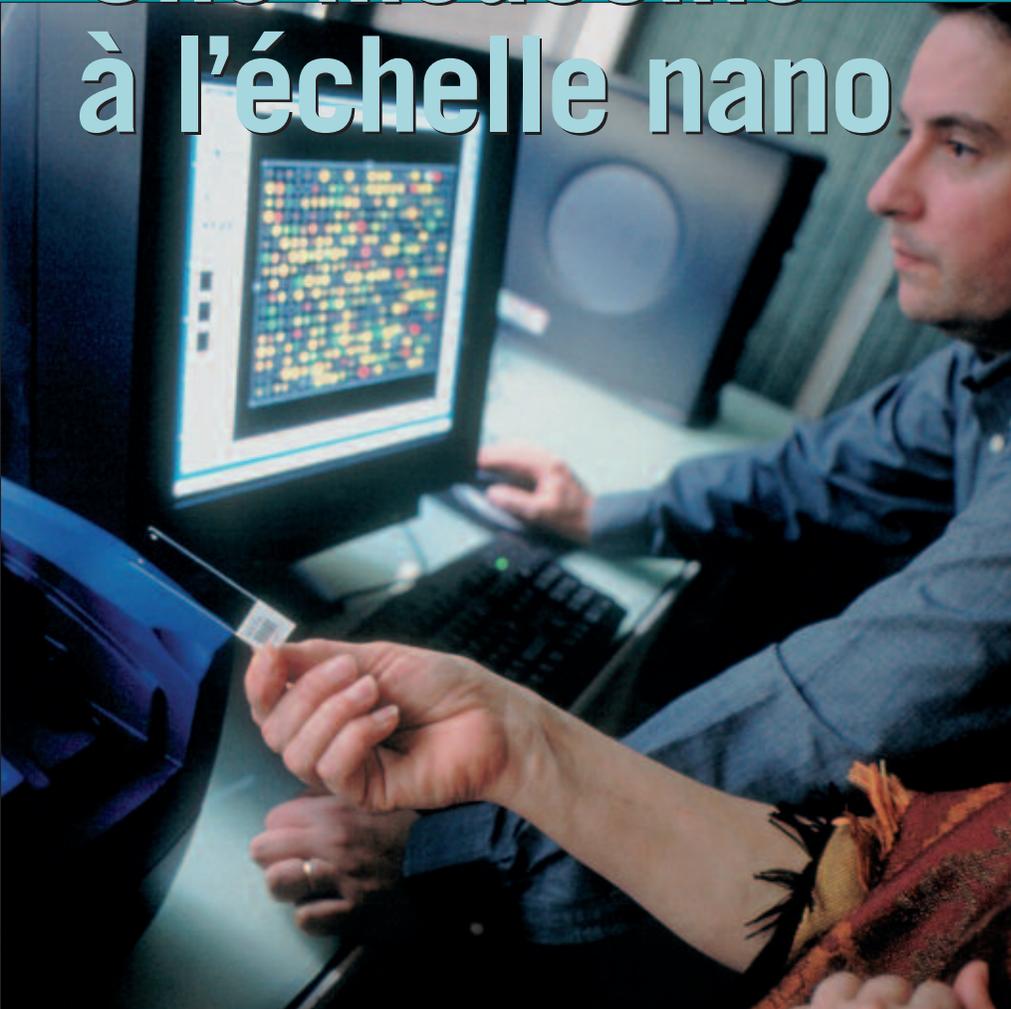


© M. Dormeillet/CEA

**Céramique de carbure de titane testée comme matériau pour les gaines des réacteurs de 4<sup>e</sup> génération.**

LES NANOTECHNOLOGIES SONT AU SERVICE  
DE LA MÉDECINE POUR LA PRÉVENTION,  
LE DIAGNOSTIC ET LE TRAITEMENT.

# Une médecine à l'échelle nano



© C. Dupont/REA

## “Les biopuces ou puces à ADN permettent aujourd’hui de tester des centaines de milliers de gènes.”

De nombreuses recherches sont actuellement menées dans le domaine de la santé afin de disposer d’outils de prévention, de diagnostic ou de traitement, rapides et adaptés.

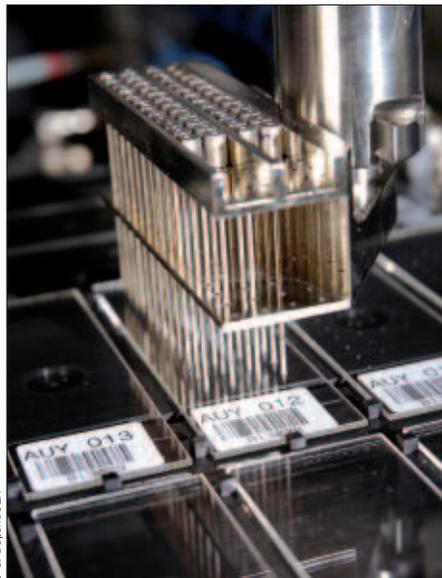
Il s’agit notamment de réaliser un diagnostic de plus en plus précoce et fin, de suivre et d’adapter les traitements en fonction de leur efficacité, ou encore de cibler précisément les médicaments vers les organes ou les tissus atteints, à moindre coût. Ces recherches visent aussi à optimiser les interventions chi-

rurgicales. Enfin, elles permettront de compléter aux fonctions altérées ou perdues tout en diminuant les risques d’effets secondaires liés aux traitements. Intervenant à l’échelle moléculaire, les nanosciences et les nanotechnologies présentent donc des atouts intéressants.

### UN DIAGNOSTIC PLUS RAPIDE

Les nanosciences permettent de mieux comprendre l’organisation et la structure des cellules, jusqu’aux protéines et à l’ADN. L’ADN est une molécule constituée de deux brins enroulés l’un autour de l’autre. Chaque brin est une succession de nucléotides. Chaque nucléotide est constitué de trois éléments liés entre eux : un phosphate, lié à un sucre pouvant porter quatre bases azotées différentes – l’adénine (A), la thymine (T), la cytosine (C) et la guanine (G). Comme sur un jeu de construction, un brin « s’apparie » à l’autre brin s’il y a complémentarité : A s’apparie avec T, et C avec G uniquement. En génétique, étudier cette imbrication (que l’on appelle « séquence ») et identifier les parties présentant des défauts ou des mutations permet de comprendre l’origine des maladies génétiques et la prédisposition de certaines personnes à des maladies données.

Acide désoxiribonucléique



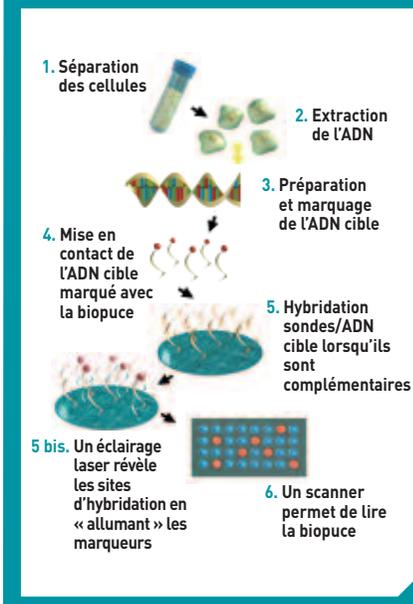
Robot de dépôt sur lamelles pour la production de lots utilisés en génomique.

L’ADN, support du génome humain, peut parfois présenter des défauts lors de sa reproduction. Sa mutation ou des incohérences peuvent alors induire la survenue de cancers. Trouver des technologies qui permettent de détecter des tumeurs à un stade très précoce, alors même qu’elles sont indétectables avec les moyens d’imagerie médicale actuels, est un enjeu majeur.

Le principe de fonctionnement des **biopuces** repose sur l’hybridation de l’ADN, selon laquelle les brins complémentaires se reconnaissent et s’apparient pour former une double hélice. Par exemple, quand on cherche à identifier une séquence d’acide nucléique responsable d’une maladie :

- des fragments d’acides nucléiques, obtenus par synthèse chimique, reproduisent cette séquence et sont donc désignés par la terminologie « sondes ». Ils sont greffés selon un ordre précis sur un support solide en verre, en plastique ou en silicium pour former un réseau dense et régulier de microsursaces. Chaque sonde peut contenir de 40 à 60 bases. Une puce peut contenir plusieurs centaines de milliers de sondes ;
- cet échantillon est traité chimiquement pour en extraire un acide nucléique appelé ARN messenger ;
- dans un mélange biologique complexe, ces ARN messagers sont mis en contact avec les fragments d’acides nucléiques « sonde » et leurs liaisons sont analysées, par une méthode de fluorescence.

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D’UNE BIOPUCE



Le concept des **puces à ADN** date de 1990 et relève d’une approche pluridisciplinaire : microélectronique, chimie des acides nucléiques, microfluidique, biologie, bio-informatique, microsystèmes et analyse d’images. L’objectif final est de proposer un traitement préventif avant l’apparition des premiers symptômes. Elles permettent maintenant de tester des centaines de milliers de gènes.



© F. Vigouroux/CEA

Les tests de détection de toxines sont très simples d'utilisation et seront donc utiles aux pompiers et urgentistes.

Elles ont l'avantage d'automatiser, de miniaturiser et de paralléliser les différentes étapes utilisées en biologie. Ainsi, sur une surface de quelques centimètres carrés, les expériences sont menées en quelques heures au lieu de plusieurs mois auparavant ou pourront être multipliées dans un temps donné. Outre les diagnostics et les traitements préventifs, les biopuces servent également à déterminer la résistance aux antibiotiques de certains microbes ou bactéries et de poursuivre les recherches pour les améliorer. En recherche pharmaceutique, elles représentent des outils précieux pour mieux comprendre l'action des médicaments, leur efficacité ou leurs effets indésirables ou secondaires.

Dans la même famille, il existe les « laboratoires sur puce » ou « lab-on-chip ». Ce sont des laboratoires miniaturisés réalisant des analyses automatisées et en parallèle sur de très petits volumes, une goutte de sang de quelques nano-

litres par exemple. Ils permettent de réduire les coûts (des réactifs et des solvants), les surfaces, l'énergie consommée. De plus, comme ces laboratoires sur puce sont mobiles, ils peuvent tout à fait s'utiliser en dehors d'un laboratoire spécialisé, par un médecin en consultation par exemple. En cas d'infection, ils permettent d'identifier rapidement l'agent responsable (virus ou bactérie), de le caractériser et d'apporter rapidement un traitement efficace.

Ces microsystèmes sont également utilisés pour les contrôles agroalimentaires (comme le suivi des bactéries productrices de ferments lactiques) et environnementaux (analyse bactérienne de l'eau de consommation, détection d'agents infectieux dans l'alimentation, l'air ou l'eau).

Les « puces à cellules » ou « cell-on-chip » sont des microsystèmes qui sont destinés à manipuler très précisément dans toutes les directions spatiales possibles et à analyser individuellement des cellules vivantes inférieures ou égales à quelques microns. Cette technique permet l'étude à l'échelle d'une cellule des effets d'une drogue ou de la **transfection** d'un gène ou encore la compréhension des interactions entre cellules...

Introduction d'un matériel génétique étranger, notamment viral, dans une cellule, afin de l'intégrer au génome de cette cellule.

## DES TRAITEMENTS PLUS EFFICACES

Pouvoir distribuer un médicament à la dose adéquate, précisément sur l'organe ou le tissu

“Sur une surface de quelques centimètres carrés, les analyses sont menées en quelques heures au lieu de plusieurs mois.”

infecté, est un véritable enjeu. Grâce aux nanotechnologies, ce rêve pourrait devenir réalité.

Aujourd'hui, les médicaments pris par voie orale ou intraveineuse se dissolvent dans l'organisme avant d'atteindre leur cible. Il faut donc administrer une forte dose au patient pour être sûr qu'une dose résiduelle atteigne la zone malade. De plus, certaines interactions avec des organes « sains » ainsi que des effets secondaires peuvent survenir. La conception de nanotransporteurs, utilisés pour la **vectorisation** des médicaments, présente deux intérêts : franchir les barrières biologiques et, grâce à un encapsulage, permettre aux molécules thérapeutiques d'atteindre leur cible sans aucune déperdition.

Les recherches en physique et en chimie tentent d'imaginer et de tester les formes de ces nanotransporteurs pour qu'ils protègent la substance active (le médicament) et que celle-ci soit libérée pendant un temps et dans un espace donnés. D'autres méthodes à l'étude



© L. Mégarid/CEA

Tri des liposomes et recueil des suspensions colloïdales en toxicologie.

consistent à intégrer les médicaments dans des nanocapsules qui libèrent leur contenu selon un temps calculé, suite à une stimulation de l'organisme ou extérieure. Par exemple, les troubles liés à l'insuline pourraient ainsi être plus facilement traités.

Utiliser des formulations médicamenteuses de la taille de nanoparticules (beaucoup plus petites que les cristaux couramment utilisés) permet une assimilation plus rapide et plus ciblée. Il est d'ailleurs possible, au moyen de marqueurs spécifiques, de suivre le parcours de ces nanoparticules dans l'organisme et de vérifier leur action sur les cellules malades. En thérapeutique, l'un des intérêts de la miniaturisation des systèmes d'analyse est de pouvoir tester rapidement un très grand nombre de molécules dans des systèmes *in vitro*. Ce criblage à haut débit permet d'identifier plus

“Disposer plus rapidement de traitements efficaces en évaluant un plus grand nombre de molécules.”



© C. Dupont/CEA

Robot de criblage qui permet, en comparant les molécules avec les 17 000 composés de la chimiothèque, de découvrir les inhibiteurs de nombre de toxines.

rapidement de bons candidats médicaments. En effet, actuellement, pour plus de 100 000 molécules testées *in vitro*, seules quelques-unes seront testées chez l'animal, *in vivo*. Ces microsystemes permettent donc de disposer plus rapidement de traitements efficaces en évaluant un plus grand nombre de molécules.

### AUTRES INNOVATIONS

Les greffes sont fréquemment rejetées par le système immunitaire du patient. Il est donc envisagé d'encapsuler les cellules greffées dans une membrane semi-perméable, constituée de matériau rendu biocompatible par l'emploi de

nanocomposés sélectionnés. Les nanopores laisseraient ainsi entrer les substances nutritives et sortir les substances sécrétées par le greffon. En revanche, les anticorps, plus gros que les nanopores, ne pourraient pas passer la barrière.

Dans le cas des prothèses, l'objectif est de fabriquer des matériaux qui ne se dégradent pas et peuvent durer au-delà des dix ans actuels. Les recherches sont menées sur les nanomatériaux composites, plus résistants que les métaux. Une autre voie étudie la possibilité d'aider un organe défaillant par un implant de taille nanométrique ou sa stimulation au moyen d'un maillage nanostructuré. En cultivant ses cellules *in vivo*, on peut aider ce tissu à se régénérer en créant des connexions nanométriques entre chaque cellule afin d'obtenir un ensemble construit et viable, comme cela a été pratiqué pour l'épiderme ou pour le cartilage.

### DES NANOGOUTTES D'HUILE POUR TRANSPORTER LES MÉDICAMENTS

Des nano-émulsions, développées par le CEA et le CNRS, pour des applications dans la vectorisation des médicaments, sont formées de gouttelettes d'huile. Le cœur de ces nano-émulsions peut contenir des substances actives. Non toxiques, elles sont « biocompatibles » et traversent les barrières biologiques pour atteindre la tumeur à traiter. Les chercheurs travaillent également sur l'interface eau/huile pour augmenter la reconnaissance spécifique avec la tumeur.

LES USAGES ET LES IMPACTS DES NANOTECHNOLOGIES FONT L'OBJET DE NOMBREUSES ÉTUDES PORTANT SUR LA MAÎTRISE DES RISQUES POTENTIELS.

# Pour un développement citoyen



© C. Dupont/CEA



© L. Godard/CEA

Prototype de détecteur de gaz toxiques pour l'environnement.

## DES APPLICATIONS DANS TOUS LES DOMAINES

Les nanotechnologies devraient permettre de créer des objets rendant plus de services en utilisant moins de matière première et d'énergie. Elles pourraient ainsi amoindrir l'impact environnemental de certaines industries (comme celles liées à l'énergie) ou activités (comme les transports ou les technologies de l'information).

Parallèlement à leur apport dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie (voir p. 20), elles contribueront à diminuer la consommation d'énergie en améliorant le rendement énergétique d'objets courants. Ainsi, citons des matériaux plus légers et résistants utilisés pour les véhicules, le remplacement des lampes à incandescence par des diodes électroluminescentes (beaucoup moins gourmandes en électricité), le remplacement des écrans cathodiques par des systèmes à cris-

taux liquides (dix fois moins consommateurs)... Enfin, un des enjeux, et non des moindres, est de développer des composants nanoélectroniques faible consommation pour des systèmes de calcul efficaces énergétiquement; 13 % de l'électricité mondiale est aujourd'hui consacrée à ce secteur!

Les nanotechnologies peuvent contribuer à la détection des pollutions: des nano-capteurs fiables, rapides et peu onéreux permettront de traquer toutes sortes de molécules organiques ou minérales indésirables dans l'eau, l'air ou le sol. Une fois détectées, il faut remédier à ces pollutions; qu'il s'agisse du traitement des eaux ou de la conception de nouveaux catalyseurs pour emprisonner les nanoparticules des fumées des moteurs d'automobiles, des réacteurs d'avions, des cheminées d'usines...

Un panel international de spécialistes a listé les dix applications des nanotechnologies jugées comme les plus intéressantes pour les pays en voie de développement: énergie (nouvelles cellules solaires et piles à combustible), agriculture (nanofertilisants), traitement de l'eau (filtration, décontamination, désalinisation), diagnostic médical, délivrance de médicaments, emballage et stockage des aliments, remédiation de la pollution atmosphérique, matériaux de construction, suivi de paramètres biologiques (glycémie, cholestérol), détection des insectes nuisibles et des vecteurs de maladies. Certaines d'entre elles ne sont pas trop compliquées, chères ou demandeuses d'infrastructures et peuvent être développées sur place. L'Inde, le

## “Des recherches en toxicologie évaluent les dangers réels ou supposés des nanotechnologies.”

Brésil ou la Chine y consacrent des investissements importants, et de nombreux autres pays, qui possèdent déjà une infrastructure universitaire et industrielle, comme l'Afrique du Sud, la Thaïlande ou l'Argentine font également de la recherche en nanotechnologies.

### RISQUES POTENTIELS

La notion de risque lié aux nanotechnologies comporte deux aspects: le danger (issu de la toxicité) et l'exposition. Les recherches en toxicologie sont là pour évaluer les dangers réels ou supposés.

L'étude de la pollution urbaine recherche son impact sur la santé humaine, notamment les effets des particules ultrafines émises par les véhicules diesel. Sur le même schéma, d'autres études qui font état d'interactions entre nanoparticules et cellules incitent à la prudence en cas d'inhalation, de pénétration par voie cutanée ou digestive. Une démarche d'anticipation est donc mise en place.

Dans les ateliers de production et de mise en œuvre, si les nanoparticules sont constituées de matière toxique (métaux lourds par exemple), elles peuvent exposer les hommes aux mêmes risques que sous forme macroscopique. Un risque potentiel supplémentaire est lié aux propriétés spécifiques des nanoparticules: surface multipliée, réactivité chimique... Des recherches sont donc menées actuellement pour étudier le devenir des nanoparticules et nanofibres si elles étaient inhalées. Les bonnes pratiques de travail sont très similaires à celles

recommandées pour tout produit chimique dangereux, mais elles revêtent une importance particulière en raison de la grande capacité de diffusion des nano-objets dans l'atmosphère. Dans le milieu industriel, il faut concevoir des procédés qui minimisent les étapes d'exposition potentielles, par exemple en réalisant la collecte des nano-objets en phase liquide afin de garantir leur non-diffusion en cas d'incident. Il faut aussi veiller à automatiser les étapes du procédé, capter les polluants à la source, filtrer l'air des locaux avant rejet dans l'atmosphère, et équiper individuellement chaque travailleur d'une protection respiratoire et cutanée.



© C. Dupont/CEA

La diffusion des rayons X aux petits angles permet de caractériser l'organisation spatiale des nanoparticules et leur agrégation, éléments fondamentaux dans la compréhension des mécanismes de toxicologie.



© C. Dupont/CEA

Dans le cas du consommateur, il s'agit d'éviter qu'il soit mis en contact avec un produit potentiellement dangereux. Ainsi, tout est mis en œuvre pour que les produits grand public ne contiennent pas de nanoparticules libres et pour éviter qu'un produit n'en génère, par exemple lorsqu'il vieillit ou se dégrade.

Des questions se posent sur les effets potentiels des nanoparticules manufacturées dans l'environnement (comportement, mécanismes de dégradation) et l'impact de leur dispersion sur les écosystèmes (danger éventuel pour certaines espèces). Des recherches visant à étudier leur écotoxicité sont mises en place. De nombreux États, comme les États-Unis et la France, se mobilisent pour évaluer et maîtriser les risques liés aux nanoparticules et leurs effets secondaires éventuels ; prenant en compte leurs caractéristiques, leurs possibles voies de contamination, les moyens de protection, les moyens de production, le comportement des nanoparticules dans l'environnement...

En Europe, le CEA s'est associé en 2005 avec des partenaires R&D de l'industrie chimique et technologique pour constituer un « projet intégré » baptisé Nanosafe 2. Ce projet se décompose en quatre axes de développement :

- technologies de détection et de caractérisation des nanoparticules dès l'étape de production ;
- réseau international pour constituer une base de données sur les effets des nanoparticules sur l'organisme et l'environnement ;
- filières industrielles entièrement intégrées, dont l'objectif est de produire sans mettre en contact le précurseur de la nanoparticule (aérosol, gaz, liquide) et le composant final ;
- études d'analyses du cycle de vie et de filières de recyclage, afin de maîtriser les effets sur la santé et l'environnement, en association avec la Commission européenne de normalisation. Pour la première fois, les répercussions sanitaires, environnementales et sociales sont considérées et étudiées parallèlement au développement des technologies et à la mise en place de méthodes sûres de production des nanoparticules. Cette simultanéité devrait permettre l'anticipation et la maîtrise des risques potentiels associés et faire évoluer des réglementations spécifiques en fonction des progrès des connaissances et des recherches en cours.

### QUESTIONS ÉTHIQUES POSÉES PAR LES NANOSCIENCES ET LES NANOTECHNOLOGIES

Par rapport à la problématique des nanotechnologies, la réflexion éthique dépasse les limites de la pure déontologie, définie comme un ensemble de comportements et de règles professionnelles. L'éthique analyse les changements que la recherche scientifique introduit

dans le monde, les responsabilités des chercheurs vis-à-vis de la société et les réactions que suscitent en son sein les nouveautés techniques. L'excellence scientifique et l'innovation doivent être accompagnées des mesures de précaution correspondant aux incertitudes sur les nouveaux produits issus des nanotechnologies. S'ils souhaitent assurer l'acceptabilité des fruits de leurs recherches, les chercheurs sont tenus à prendre en considération les intérêts des différents acteurs. De multiples rapports tentent ainsi d'évaluer les impacts potentiels des nanotechnologies sur la société, par exemple, le rapport britannique « Nanosciences et nanotechnologies : opportunités et incertitudes » réalisé en 2004. Il recommande d'appliquer le principe de précaution, tout comme le rapport du Comité de la prévention et de la précaution français en 2006, suivi par celui de l'Agence française de sécurité sanitaire et de l'environnement au travail. L'Office

parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a organisé plusieurs concertations sur les nanotechnologies et établi un rapport « Nanosciences et progrès médical », incitant à mener les recherches sur les nanosciences et nanotechnologies en parallèle avec celles sur les risques et impacts éventuels. Depuis 2005, la Commission européenne a lancé un Plan stratégique européen afin de mener une réflexion approfondie sur les risques, les usages et les impacts des nanotechnologies. Mi-2007, elle a proposé l'adoption d'un code de conduite sur le même sujet, qui a été publié en février 2008. La Commission a également mis en place en mars 2008 le nouvel Observatoire européen des nanotechnologies. Pour la France, cet observatoire s'appuiera sur l'OMNT et le LARSIM (voir encadré ci-dessous).

### DES STRUCTURES D'ÉTUDES POUR LES NANOS AU CEA

**OMNT : Observatoire des micro- et nanotechnologies.** La mission de cet observatoire, lancé en 2005 à l'initiative du CEA et du CNRS, consiste à réaliser en continu une veille scientifique et technologique dans le domaine des micro- et nanotechnologies. Il s'appuie pour ce faire sur un réseau de plus de 230 experts français et européens. Ainsi, il peut informer les organismes et ministères concernés et fournir aux industriels une information pertinente et actualisée.

**LARSIM : le Laboratoire des recherches sur les sciences de la matière a vu le jour au sein du CEA en 2007.** Premier laboratoire du CEA dédié à la philosophie des sciences, le LARSIM a pour but d'étudier et de mieux faire comprendre les enjeux de la recherche scientifique contemporaine. Parallèlement à son travail sur la place de la science dans la société, le LARSIM mène un programme de recherche en fondements de la physique.