

Les nanosciences, à l'intersection des sciences fondamentales et des technologies

Les nanosciences recouvrent des thématiques variées comme les composants électroniques ou optoélectroniques de taille nanométrique, l'interface nanophysique-chimie-biologie, l'information quantique ou bien l'élaboration de matériaux fonctionnalisés à l'échelle nanométrique. A cette échelle, la mise en œuvre des expériences, l'analyse et la compréhension des phénomènes observés font appel à des compétences multiples.

par Jean-Louis Robert (1)
Groupe d'études des semi-conducteurs
Université de Montpellier 2

Les nanosciences se réfèrent à l'étude des phénomènes observés dans des structures, systèmes-objets dont la taille est de quelques nanomètres et dont les propriétés physiques, chimiques, voire biologiques découlent spécifiquement de cette taille nanométrique. Alors que les propriétés microscopiques de la matière peuvent être expliquées en appliquant des lois

d'échelle, par référence aux propriétés macroscopiques, il n'en est plus de même dès lors que l'on aborde le domaine nanométrique. Une véritable discontinuité dans les lois d'échelle intervient quand les effets de surface deviennent non négligeables vis-à-vis de ceux en volume. Les raisonnements classiques ne sont plus suffisants pour rendre compte des propriétés nouvelles observées : de nouveaux concepts, issus de la mécanique quantique, doivent être utilisés. Bien entendu, il ne suffit pas que l'une des dimensions du système étudié soit nanométrique pour que le phénomène observé soit d'ordre quantique. Dès lors que le nombre de nanoparticules mises en jeu devient trop grand, des effets de moyenne masquent les manifestations quantiques sous-jacentes, et les lois classiques sont encore appli-

cables. C'est le cas par exemple, à température ambiante, des transistors MOS à grille sub-micronique qui fonctionnent sur un principe classique.

Les nanotechnologies sont l'un des vecteurs essentiels du développement des nanosciences. Elles permettent, non seulement, d'élaborer des structures à l'échelle du nanomètre, mais elles rendent possible la manipulation de ces nano-objets.

Cette complémentarité entre les disciplines fondamentales et les technologies est remarquablement illustrée par l'invention du *microscope à effet tunnel* par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer du laboratoire IBM à Zurich dans les années 80. Ce microscope a permis non seulement

de sonder la topologie des surfaces à des échelles de l'ordre du nanomètre au moyen d'une pointe nanométrique, mais également de « déplacer des atomes un à un, de les assembler de façon voulue ». Voilà le rêve du physicien R.F. Feynman, formulé en 1959, pratiquement réalisé. La prédiction de R.F. Feynman, consistant à faire tenir tout le contenu de l'Encyclopedia Britannica sur une tête d'épingle n'était, dès lors, plus une utopie. Utilisant ce microscope comme une « pince à atomes », Don Eigler, à IBM Almaden Research Center, réussissait à écrire le mot IBM en déposant 35 atomes de xénon sur une surface de cuivre.

Les nanotechnologies se sont développées suivant deux approches : l'une dite « bottom-up » et l'autre dite « top-down ».

L'approche « bottom-up » des nanosciences consiste à partir de la limite ultime pour fabriquer, atome par atome ou molécule par molécule, des nano-objets ou des nanosystèmes. D'autres voies que celle utilisant la microscopie à champ proche sont explorées pour produire, simultanément, un grand nombre de nanostructures fonctionnalisées. L'une d'entre elles, particulièrement étudiée, consiste à synthétiser des molécules et à fabriquer, par auto-assemblage programmé, des systèmes de plus en plus complexes

Le microscope à effet tunnel a permis de déplacer des atomes un à un et de les assembler

(1) J.L. Robert, professeur de physique à l'Université de Montpellier 2 est chargé de mission Nanosciences et affaires européennes, à la Direction de la Recherche, MRNT.

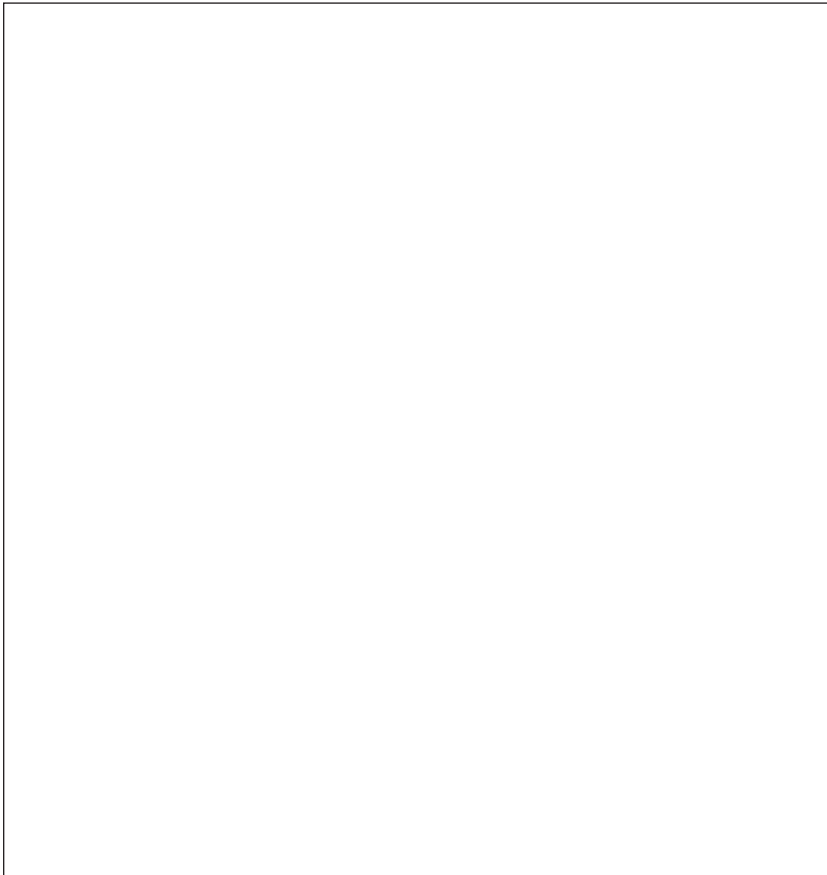


Image obtenue par microscopie électronique d'un micro-pilier de diamètre de 0,5 μm et de hauteur égale à 6 μm . Ce micro-pilier contient un plan de boîtes quantiques en son centre.

Dans l'approche « top-down » des nanosciences, les procédés de nanofabrication issus de la microélectronique sont utilisés pour réaliser des objets nanométriques. Ces technologies qui ont permis d'intégrer, sur une même puce, des composants de dimensions d'abord micrométriques puis sub-microniques, ont ouvert la voie à la fabrication de nanocomposants dont les caractéristiques et les propriétés répondent à la définition, donnée plus haut, des nanosciences. C'est le cas du transistor à un électron par exemple.

Ces deux dernières approches ont évidemment un grand intérêt pratique puisqu'elles permettent de réaliser, de façon collective, des objets fonctionnalisés de dimension nanométrique. Pour illustrer ces propos, nous allons présenter quelques exemples d'études qui s'adressent à ce type d'objets.

- Le transistor à un électron et les dispositifs à effet tunnel résonnant.
- Les boîtes quantiques et les sources à un photon.

- Les nanotubes de carbone
- Les nanoparticules fluorescentes pour la biologie

Le transistor à un électron et les dispositifs à effet tunnel résonnant

La miniaturisation des transistors, qui a conduit à une intégration de plus en plus poussée des fonctions réalisées sur une même puce, ne répond pas actuellement, même si la taille du canal est largement sub-micronique, à la définition que nous avons donnée des nanosciences. Ceci vient

du fait que le transistor fonctionne selon un principe classique, même si

certains effets parasites se manifestent plus fortement au fur et à mesure que la taille des composants diminue. Pourtant, dès que l'on s'intéresse à des composants de la taille de quelques

On forme ainsi un transistor à un seul électron (transistor SET pour *single electron transistor*)

nanomètres, d'autres effets liés au confinement et que ne peuvent expliquer les lois classiques, apparaissent. Le composant a un comportement dont seule la mécanique quantique peut rendre compte. C'est, en particulier, le cas des dispositifs à blocage de Coulomb [1-6], qui pourraient à terme prendre le relais des composants de la filière CMOS silicium, en-deçà de 30nm environ.

L'intérêt de ces dispositifs nanoélectroniques à l'état solide est considérable puisqu'ils permettraient d'accroître de façon importante la puissance de calcul des ordinateurs [7] : les prédictions théoriques de la physique fondamentale montrent que celle-ci pourrait être multipliée par un milliard par rapport aux ordinateurs actuels!

Les dispositifs à blocage de Coulomb permettraient de réaliser des mémoires intégrables à très forte densité (Terabit). La réalisation d'un composant à blocage de Coulomb suppose que soient élaborés des îlots de dimensions inférieures à 10nm, encadrés par des jonctions « tunnel ». On forme ainsi un transistor à un électron (transistor SET en anglais pour *single electron transistor*). Les deux jonctions, placées en série, sont polarisées par une tension, la charge de l'îlot intermédiaire étant contrôlée par une grille.

Le principe de fonctionnement du SET est le suivant : les dimensions de l'îlot sont suffisamment faibles pour qu'il ne puisse contenir qu'un nombre limité d'électrons. Ceux qui viennent de la source sont donc bloqués (blocage de Coulomb). Il suffit alors d'augmenter la tension appliquée sur la grille pour qu'un électron supplémentaire passe de la source à l'îlot et qu'un électron traverse le drain vers la source (apparition d'un faible courant continu). Des résultats spectaculaires ont été obtenus, montrant qu'il était possible, au prix de véritables prouesses technologiques, de fabriquer

des SET fonctionnant à l'ambiante.

Une autre approche, pour réaliser des dispositifs

nano-électroniques à l'état solide, consiste à exploiter l'effet tunnel résonnant. Les dispositifs à effet tunnel résonnant fonctionnent sur un principe similaire à celui des dispositifs à blocage

de Coulomb, sauf que le passage de l'électron, de la source à l'îlot, se fait lorsque le niveau d'énergie des électrons de la source est identique à celui des électrons dans l'îlot. Les électrons franchissent la barrière séparant la source et l'îlot, par effet tunnel résonnant. Certains dispositifs, du même type, font appel à l'effet tunnel contrôlé par une seule impureté située dans la barrière [8]. On doit noter, dans ce cas, que la « taille » de la structure permettant le passage de l'électron se réduit à celle de l'atome d'impureté.

L'étude des dispositifs nanoélectroniques à l'état solide comporte néanmoins un certain nombre de verrous technologiques qui doivent être levés pour réaliser ces composants. Prenons l'exemple des transistors à blocage de Coulomb. Le premier verrou concerne la fabrication des boîtes à électrons, qu'elles soient semi-conductrices ou métalliques. Leurs dimensions doivent être inférieures à 10 nm pour pouvoir fonctionner à des températures élevées. La réalisation des jonctions tunnel entre les îlots et les électrodes doit également être parfaitement contrôlée pour assurer une bonne reproductibilité des caractéristiques des composants. Ceci nécessite une mise au point de nouveaux protocoles, impliquant la participation conjointe de physiciens et de chimistes. Le deuxième verrou concerne la mise en place d'architectures nouvelles, compatibles avec le degré d'intégration visé et s'inscrivant dans la filière silicium. Là encore, une collaboration étroite entre physiciens, spécialistes de l'architecture des circuits et concepteurs est nécessaire. Enfin, le développement de tels composants, à l'échelle industrielle, suppose que soient mis au point des protocoles et des outils permettant une fabrication de masse. Cet effort technologique contribue à l'exploration de voies technologiques nouvelles, susceptibles de repousser la limite maximale que pourraient atteindre les techniques actuelles de lithographie d'ici 10 à 15 ans. Si tel était le cas, de nouveaux champs d'applications des nanotechnologies, pour certains insoupçonnés, deviendraient accessibles.

Les boîtes quantiques : sources à un photon

Les boîtes quantiques à base de semi-conducteurs constituent certainement l'un des exemples les plus spectaculaires de ce que l'on peut réaliser en terme de nano-objet. Ces boîtes quantiques sont obtenues à partir de couches semi-conductrices, épitaxiées (2) sur un substrat lui-même semi-conducteur, présentant un désaccord de maille assez important (par exemple de l'InAs sur du GaAs). Si les premières couches épitaxiées croissent de façon bidimensionnelle, au-delà d'une certaine épaisseur critique, on observe la formation spontanée d'îlots de dimension nanométrique (*phénomène d'auto-organisation*) [8]. On obtient donc un ensemble de boîtes quantiques, isolées les unes des autres. Typiquement, les îlots ont la forme de lentilles très aplaties dont le rayon à la base est de 10nm et la hauteur de 3nm environ. Ces boîtes contiennent un petit nombre de paires électron-trou qui présentent des niveaux d'énergie discrets et distincts. Cette discrétisation des niveaux électroniques dans les boîtes incite à faire l'analogie avec la physique des atomes uniques, dont les propriétés ne peuvent être inter-

prêtées que par la physique quantique. De ce point de vue, les boîtes à semi-conducteur relèvent parfaitement de la définition que nous avons donnée des nanosciences.

Les boîtes quantiques de taille nanométrique à base de semi-conducteur constituent une voie possible pour produire des sources lumineuses susceptibles de générer un seul photon [9-11]. Il suffit pour cela de sélectionner une boîte unique contenant une seule paire électron-trou et de l'insérer dans une cavité optique de taille nanométrique (par exemple un micro-pilier). La boîte unique constitue un émetteur unique produisant des photons, un par un, et la cavité optique canalise ces photons émis, un par un, dans une direction préférentielle de collection. Le développement de telles sources lumineuses, générant des états quantiques de la lumière, constitue un des défis posés par la distribution quantique de clés de codage (cryptographie quantique) ou, plus largement, pour le traitement quantique de l'information.

(2) Les structures épitaxiées sont des empilements de minces couches monocristallines de matériaux semi-conducteurs.

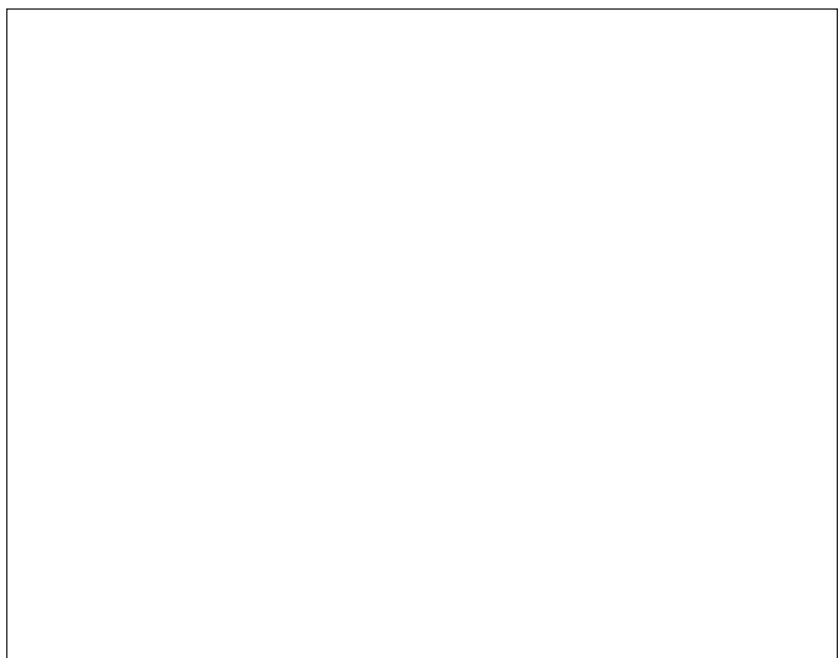


Image obtenue par microscopie électronique en transmission d'un micro-pilier de diamètre de 0,5 μm et de hauteur égale à 6 μm . Ce micro-pilier contient un plan de boîtes quantiques en son centre.

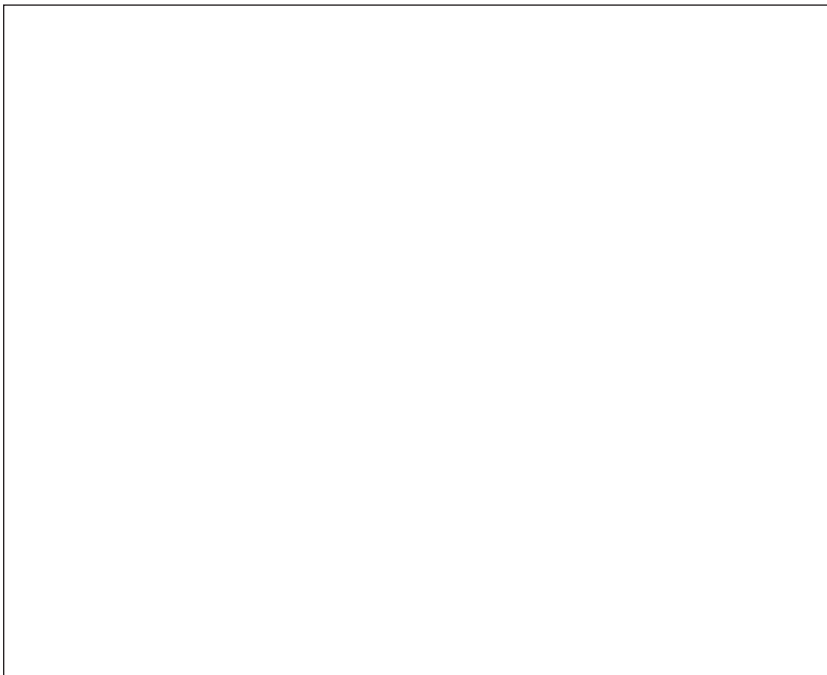


Photo prise au microscope électronique à balayage d'un nanotube de carbone multiparois déposé sur un substrat de Silicium. En utilisant la lithographie électronique, après repérage du nanotube, des électrodes de contact en or sont déposées sur le nanotube : elles permettent de déterminer ses propriétés électriques.

Le traitement quantique de l'information ouvre des perspectives sur ce que pourraient être les dispositifs quantiques de communication et de calcul de demain. Pour exemple, les protocoles et dispositifs de cryptographie quantique, qui exploitent le principe d'incertitude d'Heisenberg, permettent d'échanger une clé de cryptage à base de photons, qui est inviolable dans l'absolu. Ils permettent donc de garantir une sécurité totale pour la distribution d'une information codée, en s'appuyant sur un principe fondamental de la mécanique quantique et non sur la puissance de calcul, comme les solutions usuelles de cryptographie. Evidemment, la possibilité de disposer de telles sources fonctionnant à haute température constitue un des objectifs visés. Le choix de matériaux à large bande interdite comme CdSe/ZnSe devrait permettre de réaliser des sources émettant à température ambiante dans le bleu, domaine spectral bien adapté à la transmission en espace libre. On notera que, dans cet exemple, le phénomène d'auto-organisation relève plutôt d'une approche « bottom-up », tandis que la réalisation du composant (boîte dans une cavité optique) fait appel aux techniques de

nanofabrication selon l'approche « top-down ».

Les nanotubes

En 1985, était découverte une molécule formée d'un assemblage de 60 atomes de carbone disposés selon une configuration semblable à celle d'un ballon de football. Cette molécule, qui appartient à la famille des fullerènes, troisième forme allotropique du carbone après celles du graphite et du diamant, a été fortement étudiée jusqu'en 1991, date à laquelle ont été découverts, par microscopie électronique, les nanotubes de carbone par Sumio Iijima de la compagnie NEC au Japon. Les nanotubes de carbone avaient été fabriqués bien auparavant sans que l'on n'y ait prêté attention.

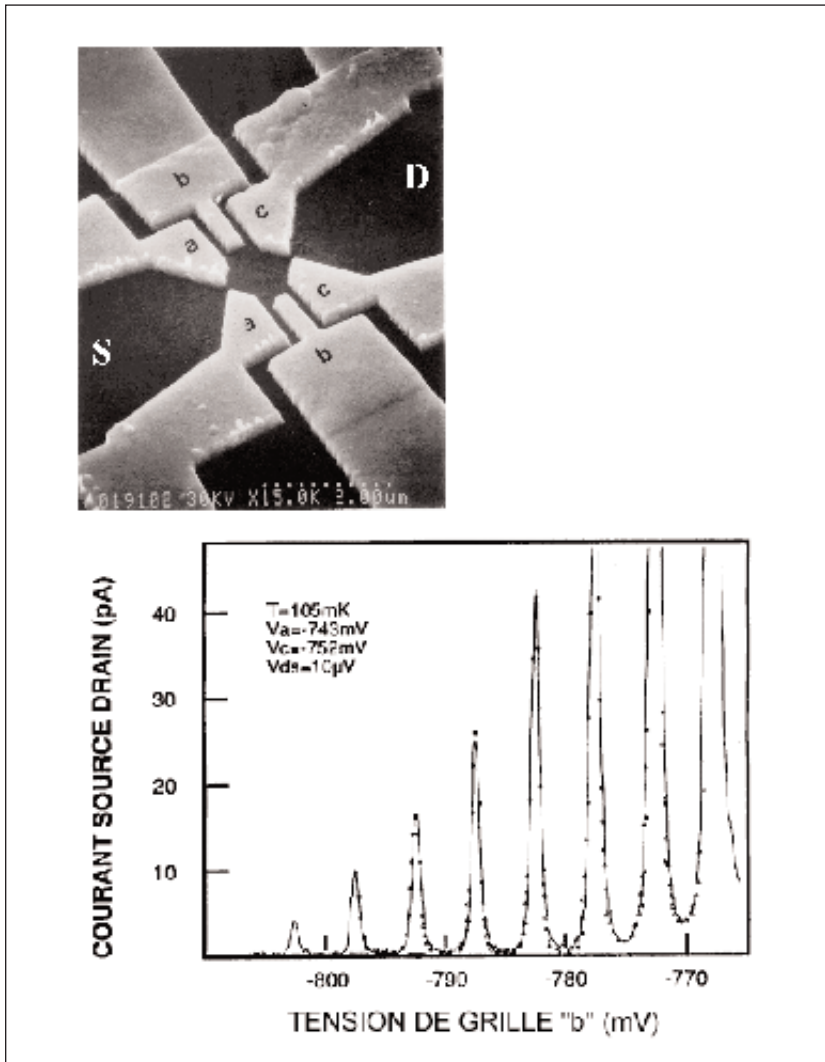
Les nanotubes de carbone sont des cylindres « graphitiques » constitués d'hexagones, fermés à leurs extrémités par un chapeau de type fullerène. Ils sont fabriqués suivant plusieurs méthodes : par arc électrique, par vaporisation d'une cible de carbone au moyen d'un laser ou en faisant pas-

ser du méthane sur un catalyseur, favorisant sa décomposition. Ces nanotubes peuvent être constitués d'un seul cylindre (nanotube monoparois) ou de plusieurs nanotubes coaxiaux (nanotubes multiparois). Ce sont les conditions d'élaboration qui déterminent le type de nanotubes obtenu.

L'intérêt porté sur les nanotubes de carbone [12-14] vient des propriétés tout à fait particulières qu'ils possèdent. Suivant la structure obtenue, les nanotubes peuvent être conducteurs ou semi-conducteurs. Les nanotubes de carbone sont très stables chimiquement. Leurs propriétés mécaniques sont tout à fait étonnantes : leur module d'Young est d'environ 1TPa et leur résistance à la rupture est de l'ordre de 50GPa soit, environ, 10 fois celle de l'acier ou du kevlar. Leur densité est de 1,33 à 1,4 gramme par centimètre cube, soit deux fois moins que l'aluminium. La conductivité thermique (6000 watts par mètre et par kelvin à la température ambiante) est deux fois supérieure à celle du diamant et vingt fois celle du cuivre. L'ensemble de ces propriétés ouvre des perspectives d'applications considérables dans de nombreux domaines, même si, à l'heure actuelle, le moyen d'assembler ces nanotubes entre eux, de façon à les rendre plus facilement utilisables, reste à trouver.

L'une des voies envisagées, qui pourrait s'avérer prometteuse, consiste à disperser ou agréger des nanotubes dans des solutions de tensioactifs et de polymères. Ainsi, en dispersant des nanotubes sur une membrane filtre, on peut obtenir une galette de nanotubes, appelée papier de nanotubes. Récemment, un procédé a été proposé pour réaliser du fil de nanotubes orientés. Le procédé consiste à disperser des nanotubes dans une solution aqueuse qui est injectée dans l'écoulement d'une solution coagulante de polymères adsorbants. La résistance mécanique de tels fils reste malgré tout assez faible, surtout si on la compare à celle des nanotubes eux-mêmes. Le module d'Young est de

Des applications médicales du fil de nanotubes sont la fabrication de prothèses ou de fibres musculaires artificielles



Transistor à commande monoélectronique basé sur le principe du blocage de Coulomb : le flux d'électrons entre la source « S » et le « D » est contrôlé par deux barrière tunnels constituées par deux grilles « a » et « c ». Le nombre d'électrons dans l'îlot est contrôlé par la grille « b ». Lorsque la capacité « C » de l'îlot est suffisamment petite, l'énergie de Coulomb d'un électron $e^2/2C$ peut devenir importante comparée à l'énergie thermique. La transparence des barrières tunnels dépend alors de la charge de l'îlot. A très basse température, des oscillations en courant peuvent être observées entre la source « S » et le drain « D » lorsque la tension de grille « b » varie continuellement. Entre chaque oscillation, la charge de l'îlot varie de la valeur d'un électron.

quelques dizaines de GPa, et la résistance à la rupture de 300 MPa seulement. Il n'empêche que ces performances sont susceptibles d'être grandement améliorées. Ceci permet d'envisager l'apparition, sur le marché, de matériaux composites à la fois légers et résistants, utilisables dans le bâtiment et la mécanique, et permettant, entre autres, des applications médicales comme la fabrication de prothèses ou de fibres musculaires artificielles.

Dans un autre domaine, les propriétés de conduction électrique des nanotubes peuvent être mise à profit pour fabriquer de nouveaux composants électroniques. Des nanocomposants ont été réalisés en laboratoire, en mettant en contact, au moyen d'une « pince nanométrique », un nanotube semi-conducteur avec deux électrodes métalliques. La difficulté rencontrée pour manipuler des nanotubes est, bien entendu, un

problème en vue d'un éventuel développement de ce type de nanocomposants : des méthodes de fabrication plus facilement « industrialisables » restent encore à inventer. Il existe, toutefois, des applications industrielles des nanotubes : on peut citer, par exemple, dans le domaine de l'électronique, les afficheurs (écran plat) à émission de champ dans lesquels les nanotubes servent de pointes émettrices [15-16]. L'annonce du lancement de ce produit, en 2004, vient d'être faite par la société Samsung. Dans un tout autre domaine, il est envisagé d'utiliser, à plus long terme, les nanotubes de carbone, ou d'autres compositions, pour le stockage de l'hydrogène.

Même si les nanotubes sont riches de promesses, leur développement ne se fera, malgré tout, qu'au prix d'un effort soutenu en recherche fondamentale mais également technologique.

Les nanocristaux fluorescents pour la biologie

La synapse est la zone intercellulaire où s'opère la communication entre deux neurones. Les récepteurs présents sur la membrane du neurone « cible » sont activés par les neurotransmetteurs libérés par les terminaisons nerveuses du neurone émetteur. L'utilisation de marqueurs attachés aux récepteurs s'avère nécessaire pour étudier le fonctionnement dynamique de ces récepteurs.

Il existe une grande variété de molécules organiques fluorescentes susceptibles d'être attachées au système étudié. Malheureusement, le phénomène de blanchiment observé sur les molécules fluorescentes dont la dimension est de quelques nanomètres, les rend inopérantes au bout de quelques secondes. Ce phénomène

Les nanocristaux peuvent être utilisés pour le marquage moléculaire dans les cellules vivantes

limite grandement leur utilisation. Des travaux récents [17] conduits par deux

équipes de physiciens et de biologistes de l'ENS et de l'INSERM, ont montré que l'utilisation de nanocristaux de semi-conducteurs rendait cette observation possible pendant

plusieurs dizaines de minutes et permettait, donc, de suivre le mouvement des récepteurs. L'expérience, réalisée sur des cultures de moelle épinière de rat, a mis en évidence des aspects jusqu'ici insoupçonnés de la dynamique des protéines participant à la communication entre les neurones. Alors que l'on pensait que la synapse était stable et que les propriétés des récepteurs étaient fort peu modifiées d'un instant à l'autre, cette expérience a montré que la synapse était en équilibre dynamique. Les propriétés de fluorescence, remarquables, des nanocristaux de CdS ont donc été mises à profit pour réaliser cette expérience sans précédent. Eclairés en ultraviolet, ces nanocristaux émettent de la lumière dont la longueur d'onde change en fonction de leur dimension (effets de confinement). Par exemple, le rayonnement émis est successivement bleu, vert et rouge pour des tailles de grain de 2nm, 3nm, 5nm. Dans cette expérience, les nanocristaux de CdSe sont entourés d'une coquille ZnSe et ont une taille de 5 à 10 nanomètres, comparable à celle des protéines impliquées dans la communication entre les neurones. Ces nanocristaux peuvent être utilisés pour le marquage moléculaire. Ils peuvent être utilisés pour suivre l'évolution de processus biologiques dans les cellules vivantes. Ce travail est une démonstration évidente de l'apport des nanotechnologies à la recherche en biologie.

A travers ces exemples, il apparaît que l'essor des nanosciences réside, pour une large part, dans la convergence d'approches interdisciplinaires intervenant à l'échelle du nanomètre. En effet, à cette échelle, les phénomènes physiques, chimiques, biologiques sont étroitement mêlés et leur analyse repose sur la confrontation d'approches scientifiques et technologiques à la frontière des disciplines. Le domaine des nanosciences ne cesse de s'élargir, offrant des perspectives d'applications potentielles très prometteuses, parfois insoupçonnées.

Compte tenu des enjeux, ce champ disciplinaire doit pouvoir se développer en même temps que les nanotechnologies. En raison du caractère particulier de la recherche, il est important que soient favorisées l'émergence et la structuration d'équipes pluridisciplinaires.

Au vu des enjeux économiques, il faut aider à la diffusion des résultats, qui sont à la source de l'innovation et accroître les relations entre la recherche académique et l'industrie.

Dans ce domaine rapidement évolutif, les collaborations internationales et les partenariats européens sont à encourager pour rester au meilleur niveau.

Enfin, les enjeux sociétaux des nanosciences sont importants : la formation dans ce domaine est essentielle. L'information doit également être une des préoccupations des acteurs du domaine. Les questions éthiques doivent être examinées de près compte

tenu, en particulier, de l'interférence des nanosciences et des nanotechnologies avec le monde vivant. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.H. Devoret, Daniel Estève, C.Urbina, Le courrier du CNRS, Images de la Physique 1991, supplément au n° 77 p.85-91.
- [2] L.J Guo et al., A single electron transistor memory operating at room temperature Science 275 : 649, 1997
- [3] Quantum dots heterostructures, D.Bimberg et al., John Wiley and Sons Ltd., 1998.
- [4] M.H. Devoret, C. Glattli, Single-electron transistors, Physics World, Vol 11,n°9, Sept. 1998, P. 29-33.
- [5] M.H. Devoret, R.J. Schoelkopf, Amplifying quantum signals with the single l-electron transistor, Nature 406 (2000) p. 1039 – 46.
- [6] D. Vion, A.Aassime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Estève, M. H. Devoret, Manipulating the quantum state of an electrical circuit, Science 296 (2002), p. 286 – 9.
- [7] M. Grygjas, M. Baj, B. Jouault, G. Faini, A. Cavanna, Resonant tunneling through single donor states in GaAs/GaAs devices, Physica E 17 (2003) 303-304.
- [8] J.Y. Marzin, J.M.Gérard, A.Izraël, D. Barrier et G. Bastard, Photoluminescence of single InAs quantum dots obtained by self-organized growth on GaAs, Phys. Rev. Lett. 74, 4043 (1995)
- [9] J.M. Gérard and B. Gayral, Strong Purcell effect for InAs quantum boxes in three dimensional solid-state microcavities, J. Lightwave Technol. 17, 2089 (1999)
- [10] C. Santori, M. Pelton, G. Solomon, Y. Dale and Y. Yamamoto, Triggered single photons from a quantum dot, Phys. Rev. Lett. 86, 1502 (2001)
- [11] E. Moreau, I. Robert, L. Manin, V. Thierry-Mieg, J.-M. Gérard and I. Abram, « A single-mode solid-state source of single photons based on isolated quantum dots in a micropillar », Appl. Phys. Lett. 79, 2865 (2001)
- [12] M. Dresselhaus et al., 1998, Carbon Nanotubes Physics, World January, p. 33-38.
- [13] B. Vigoto, P. Poulain, Le courrier du CNRS, Images de la Physique 2002, p.36-42.
- [14] S. Roth, J. Wang, P. Bernier, E. Palmer, Application of nanotubes, Ecole d'Aussois sur les nanotubes, Avril-Mai 2003, to be published by Springer Verlag.

- [15] Q.H. Wang et al., A nanotube-based field-emission flat panel emission display, *App.Phys. Lett.* 72 (22) 2912 (1998)
- [16] W.B. Choi, Y.W. Jin, H.Y. Kim, S.J. Lee, M.J. Yun, J.H. Kang, Y.S. Choi, N.S. Park, N.S. Lee, J. M. Kim, Electrophoresis deposition of carbon nanotubes for triode-type field-emission display, *App.Phys.Lett.* 78 (11) 1547 (2001).
- [17] M. Dahan, S. Levi, C.Luccardini, P. Rostaing, B. Riveau, A. Triller, Diffusion dynamic of glycine receptors revealed by single quantum dot tracking, *Science* vol.32 n°5644 oct. 2003.

Remerciements pour crédits photographiques : Laboratoire de Photonique et Nanostructures – CNRS.