

FOCUS

LES NANOSCIENCES

LES NANOSCIENCES

Construire, comprendre, contrôler la fonctionnalité de nano-objets ou d'empilements de nano-objets, ceux que la nature fournit, ceux que le scientifique élabore atome par atome ou découpe au « scalpel nanométrique » d'extrême précision, est un projet essentiel de la science en ce début du 21^e siècle.

À la fin des années 90, le CNRS a porté le programme Nano-objets individuels et pu jouer ainsi son rôle d'incubateur à « l'action concertée nanosciences » développée par le ministère de la Recherche et les organismes CNRS, Commissariat à l'énergie atomique et Délégation générale pour l'armement réunis. L'ampleur et le cadre donnés à cette action prioritaire ont permis au CNRS d'assumer la coordination d'un Consortium, initié par le ministère de la Recherche et reconnu et soutenu comme Eranet par la Commission européenne, regroupant les programmes en nanosciences de dix pays.

En 2005, selon le recensement du Consortium européen, l'effort national s'appuie sur 190 laboratoires en France, dont 166 associés au CNRS, avec 1700 chercheurs et enseignants-chercheurs à temps plein, 1250 doctorants et stagiaires post-doctoraux et 500 ingénieurs et techniciens. Cet effort s'inscrit dans un contexte où l'Europe dans son ensemble consacre environ un milliard d'euros à ce domaine de recherche.

Les nanosciences ouvrent de nouvelles voies à l'interdisciplinarité, de l'information quantique aux nanobiosciences, portées par les axes forts de la nanoélectronique, du nanomagnétisme, de la nanophotonique et de la nanochimie, de nouveaux champs pour les mécaniques des solides et des fluides, de nouvelles métrologies et instrumentations, et enfin de nouveaux espaces pour les théoriciens, souvent ravis de restreindre la taille de l'objet étudié. L'éthique est une composante non négligeable de cette recherche.

Dans ce cadre, le CNRS, accompagné des universités et des autres organismes, prend toute la mesure de l'effort à conduire et joue un rôle intégrateur conforme à sa mission pluridisciplinaire et à sa vocation européenne.



Bernard Larrouturou
Directeur général du CNRS

Septembre 2005

LES NANOSCIENCES

Introduction	6
Agir dans les espaces de recherche	10
Travailler à l'échelle du nanomètre	12
Élaborer et comprendre les nano-objets	16
Construire des nanosystèmes	22
Inventer des nanomatériaux	32
Anticiper l'impact social et les risques	38
Conclusion	40
Quelques indicateurs	42

Les nanosciences, un défi du 21^e siècle : de nouvelles perspectives scientifiques et technologiques au cœur de l'infiniment petit

Dans l'ensemble des pays industrialisés, on assiste à un essor considérable des nanosciences, prises au sens large c'est-à-dire incluant les innovations technologiques. Construire, comprendre, contrôler la fonctionnalité de nano-objets ou de dispositifs intégrant un grand nombre de nano-objets élaborés atome par atome ou avec les « scalpels nanométriques » est au cœur de la science, de l'ingénierie et de la technologie du début du 21^e siècle. Les États-Unis (*National Nanotechnology Initiative*) et la France (Agence nationale de la recherche) affichent les nanosciences comme une des clés majeures de l'activité économique de demain. Elles forment également une des priorités essentielles du CNRS.

Pour introduire ce *Focus Les nanosciences*, viennent à l'esprit une idée et une image qui ont mis près de quarante ans à converger dans une fertilisation croisée.

There is plenty of room at the bottom. Cette phrase de Richard Feynman (prix Nobel de physique 1965), prononcée fin 1959 à la réunion annuelle de la Société américaine de physique dans un discours fondateur, est seulement mise en œuvre au tournant de ce millénaire. Elle reflète sa solide conviction qu'une poignée d'atomes ou de molécules, découpée à volonté avec une maîtrise quasi-chirurgicale ou rassemblée pièce par pièce, donnera des propriétés nouvelles et des concepts imposés par la mécanique quantique, hors du sens commun. Propriétés et concepts s'écarteront largement de celles et de ceux que le métal, le grain de sable, le verre, le polymère révèlent à nos instruments lors d'une mesure effectuée sur un objet macroscopique fait de quelques millions de milliards d'atomes ou molécules. À l'inverse de cette situation où l'effet collectif prédomine, le petit amas détermine sa « signature fonctionnelle » par sa petite taille, sa forme, ses briques de base.

Small is beautiful and should be kept clean down to an extreme level. La salle blanche, propre à l'extrême au point d'enfermer l'homme dans un scaphandre, renvoie à l'idée d'un sanctuaire où les technologies de fabrication et les métrologies du monde petit ne tolèrent plus la moindre poussière, la moindre perturbation.

L'innovation dans le monde nano- requiert de faire sauter des verrous dans le domaine des matériaux et des procédés, des architectures, des énergies distribuées et consommées, de la connectique, de la résistance mécanique de chaque élément du composant. D'un côté le mur quantique est en face de nous, de l'autre des percées significatives permettent de proposer de nouvelles routes fructueuses.

Un engagement considérable des ressources humaines et financières

La diversité des applications des nanotechnologies a suscité des investissements qui se mesurent en milliards d'euros aux États-Unis, en Europe et au Japon. En mai 2005, le programme américain *National Nanotechnology Initiative* (NNI) a estimé l'effort mondial à 9 milliards de dollars.

Aux États-Unis, le gouvernement a consacré 1 milliard de dollars fédéraux en 2004 à ce domaine de recherche, dont 65 % pour financer la recherche académique. Cet investissement gouvernemental, initié il y a trois ou quatre ans, est triplé par l'apport des États et de l'industrie. Onze agences de moyens autour la NSF conjuguent leurs efforts et consolident leur coordination.

Au Japon, l'investissement dans le programme national *Nanosciences* japonais se monte à 850 millions d'euros par an, montant également triplé par l'apport des industries, des régions et des universités.

En Europe, le budget consacré aux recherches en nanosciences s'élève à environ 1 milliard d'euros par an, dont 700 millions d'euros se composent des contributions nationales des pays de l'Union européenne et 300 millions relèvent du budget 2005 de la priorité « nanosciences et nanotechnologies » du 6^e programme-cadre de recherche et de développement technologique (PCRDT). Au total, la communauté européenne aura consacré 1,3 milliard d'euros à cette priorité sur les cinq ans du 6^e PCRDT.

En France, la toute nouvelle Agence nationale de la recherche (ANR) a retenu les nanosciences et les nanotechnologies comme l'un des quatre secteurs prioritaires et lui a consacré un programme spécifique baptisé *PNano*, qui organise le financement de ce domaine et succède au soutien mis en place précédemment par le ministère de la Recherche. Au delà de l'apport par les organismes de recherche et les régions, ce financement par le ministère de la Recherche consistait en, d'une part, un soutien par la Direction de la technologie à l'équipement des grandes centrales de nanotechnologie et au Réseau de recherche en micro- et nanotechnologies (RMNT) ; d'autre part, du soutien direct par la direction de la Recherche associée au CNRS, au CEA-DSM et à la Délégation générale pour l'armement (DGA). Ce soutien direct concernait les équipes répondant à des appels d'offres, ainsi que les centrales de proximité, plateformes de technologie souples, plus flexibles en termes de taille de substrat et d'ouverture à une grande diversité de matériaux.

Une dynamique française remarquable dans sa cohésion

L'effort français est prolongé par l'action d'un consortium des programmes de dix nations en Europe, constitué sous l'impulsion du ministère de la Recherche, coordonné par le CNRS et financé par la Commission européenne dans le cadre des programmes de coordination *Eranet*. Les partenaires du consortium ouvriront mutuellement leurs appels d'offres à la collaboration transnationale et à l'évaluation commune.

La cohésion de l'effort des partenaires français, la volonté de coordination européenne, ont été bien perçues par l'ANR. Sur le terrain, la formation de centres de compétences baptisés C'Nano, un par grande région, assure une mise en réseaux des centrales de proximité et permet de construire une information claire, consolidée, destinée aux tutelles, régions et partenaires industriels. Les centres C'Nano mis en place en 2004 et 2005 sont les outils d'optimisation et de coordination nécessaires aux nombreux laboratoires français (190 recensés) engagés dans le développement rapide des nanosciences.

Les nanosciences, sources d'objets de grande consommation de demain

Les nanosciences sont déjà au cœur d'objets de grande consommation. Quelques dizaines de milliards de têtes de lecture de disques durs sont produites annuellement, utilisant quasiment toutes la magnétorésistance tunnel (TMR), forme achevée et quantique de la magnétorésistance géante découverte par Albert Fert (médaille d'or 2003 du CNRS) et Peter Grünberg. Autre exemple, les nanolasers sont aujourd'hui déjà dans les têtes de lecture des lecteurs DVD.

Il est donc naturel d'envisager un rôle central des nanosciences dans l'évolution des petits et grands calculateurs, de l'écran plat – stimulé par une matrice de « canons à électrons » faits de nanotubes de carbone – ou dans l'accompagnement de systèmes communicants, du téléphone portable (son et image réunis) à l'étiquetage des produits. L'impact sur ce segment est incontestable, que ce soit pour les dispositifs au cœur des fonctions ou les nouvelles approches de la connectique où rapidité et bilan thermique pourront imposer les nanolasers et les guides de lumière nanométriques.

En plus de ces applications pour l'électronique, l'informatique et les télécommunications, les nanosciences vont conduire à des révolutions dans des domaines aussi variés que la médecine et la santé, la sécurité et les transports, l'environnement et l'énergie, la prévention des risques sismiques, la biotechnologie et l'agriculture... La vision nocturne du conducteur d'automobile sera assistée par l'intervention combinée de nanodiodes et de capteurs matriciels restituant une image dépourvue du flou produit par la lumière diffusée.

En 1965 le laser nécessitait une intensité-seuil de $100\,000\text{ A/cm}^2$, en 1970 dix fois moins, en 2005 les lasers à base de boîtes quantiques ont réduit leur seuil à 6 A/cm^2 . Ces sources de lumière, de grande durée de vie, trouveront des applications dans les nouveaux produits nomades. Elles seront également sources d'économies d'énergie dans des domaines étiquetés basse technologie. Au moins 50 % d'économies sont envisagées dans l'éclairage public, avec des matrices de nanodiodes robustes exigeant une maintenance extrêmement réduite. L'éclairage domestique ne nécessitera que de la basse tension (12 V au lieu de 220 V), offrant une meilleure sécurité. Dans un avenir plus ou moins proche, il deviendra possible de construire des capteurs si précis qu'ils détecteront un morceau de sucre jeté dans un lac ou encore de concevoir de nouveaux dispositifs utilisables pour la dépollution ou le stockage de l'énergie.

Autres fruits des nanosciences et des nanotechnologies, la source de photons un-par-un, le gaz d'électrons confinés dans une seule couche de 60 nanomètres de large, le transistor à un électron, la communication quantique sont au cœur de nouvelles pistes ambitieuses tant scientifiquement que technologiquement.

La théorie et les simulations sont des instruments aussi importants que les nouvelles instrumentations et méthodes expérimentales pour entrer dans ces champs très riches ouverts par les nano-objets.

L'éthique et les préoccupations de la société face aux avancées et risques potentiels des nanosciences

L'éthique, qui synthétise le souci de l'homme de faire vivre ensemble, harmonieusement et correctement, nos générations et les suivantes, vise à une analyse des fondements moraux des découvertes dans un débat transparent, ouvert à tous les publics où le scientifique redevient un des citoyens concernés.

Dans le domaine des nanosciences, la perspective de la maîtrise de la complexité aux plus petites échelles sert parfois de support à des raisonnements difficiles à accompagner, utilisant la peur comme levier principal. Même reposant sur des assises faibles, ces discours négatifs sont à considérer : ne pas se retirer du débat éthique public est une obligation. Un des premiers jalons de ce débat est sans doute de mesurer et de reconnaître l'écart gigantesque qui sépare la maîtrise d'une ou de quelques fonctions combinées à l'échelle du nanomètre et la maîtrise de la complexité du vivant, née de l'empilement extrêmement spécifique de milliards de fonctions élémentaires, où les apports énergétiques, thermiques et chimiques s'opèrent avec des sélectivités hors d'atteinte, dans toute leur globalité, dans un avenir mesurable. Dans les nanosciences, la complexité des produits envisageables dans le cadre d'une démarche prospective fondée et réaliste est plus proche de celle de la molécule thérapeutique avec une ou deux fonctions que du robot prenant possession du cerveau humain.

Le CNRS, aux avant-postes du pilotage de cette action prioritaire

Le CNRS, établissement pluridisciplinaire, présent dans toutes les grandes régions de l'hexagone, au sein de partenariats forts avec de nombreux établissements ou universités européens et internationaux, est naturellement au cœur du développement de la recherche amont des nanosciences et nanotechnologies en France. C'est l'une des cinq grandes thématiques affichées par l'établissement.

Le CNRS, incubateur de thèmes scientifiques innovants, est aussi créatif pour doter la communauté des chercheurs de structures de concertation, groupements de recherche ouverts à tous les établissements et universités. C'est à travers de tels outils que peut se concrétiser le support d'une concertation réactive, fluide tout en restant largement ouverte, à périmètre adaptable.

Pour autant, n'oublions pas que toute stratégie de recherche se développe au sein des laboratoires : le CNRS les a fortement incités à s'engager dans cette direction prioritaire, apportant ressources humaines et plates-formes dotées d'équipements mutualisés pour amplifier très significativement leurs moyens d'action.

Ce *Focus Les nanosciences* présente, de manière non exhaustive, l'étendue et la diversité des thématiques étudiées en nanosciences dans les laboratoires du CNRS et les laboratoires mixtes du CNRS avec les universités ou d'autres organismes.

La recherche en nanosciences

Le CNRS est le principal acteur public dans le domaine des nanosciences. Au delà de la mise en œuvre de la politique scientifique de l'établissement, il contribue également à la définition d'une politique nationale cohérente de structuration des communautés et de déploiement des infrastructures nécessaires.



© CNRS Photothèque.

Le programme national *Nanosciences*

Le programme national *Nanosciences* a été lancé en 2003 pour soutenir, structurer et développer la recherche fondamentale dans ce domaine clé. Ce programme est coordonné conjointement par le ministère chargé de la Recherche, le CNRS, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et la Délégation générale pour l'armement (DGA), via un comité de coordination. Ses principaux modes d'action comprennent le lancement d'appels d'offres annuels et le financement des meilleurs projets scientifiques, le soutien aux actions de formation, d'animation et de structuration de la communauté scientifique, ainsi que l'aide à la mise en réseau de moyens de technologie de proximité. Les départements du CNRS ont activement participé au pilotage de ce programme et l'organisme contribue à son financement via le programme interdisciplinaire de recherche *Nanosciences-Nanotechnologies*. Dès la première année, l'ANR a inscrit dans ses priorités le programme *PNano* (Programme national en nanosciences et nanotechnologies) et l'appel d'offres 2005 a été ouvert, dans la continuité de l'effort entrepris.

Le réseau des centrales de technologie

Le ministère chargé de la Recherche a mis en place en 2003 un réseau de grandes centrales de technologie impliquant le CNRS, le CEA et les universités. L'objectif de ce réseau, qui organise les ressources technologiques françaises en micro- et nanotechnologies, est de doter la France d'une nouvelle infrastructure publique recelant des moyens techniques performants qui lui permettront de répondre aux enjeux mondiaux des nanotechnologies. Outre les centrales de proximité, les cinq grandes centrales du réseau sont situées à Grenoble autour du CEA-Léti/Minatec, à Besançon autour de Femto, à Lille autour de l'EMN, à Toulouse autour du Laas et en Ile-de-France autour de l'IEF et du LPN. Les centrales de ces quatre dernières régions sont implantées dans des laboratoires propres ou associés au CNRS. La création de ce réseau vient compléter le dispositif national de recherche en nanosciences, qui inclut également, pour les recherches amont, les organismes de recherche (CNRS, CEA, universités, écoles d'ingénieurs...), le programme national *Nanosciences* et, pour les partenariats recherche-industrie, le Réseau de recherche en micro- et nanotechnologies (RMNT) et les structures de recherche des industries, comme les clusters Eureka Medea +, Pidea et Eurimus.

Femto : Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique

IEF : Institut d'électronique fondamentale

IEMN : Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie

Laas : Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes

Léti : Laboratoire d'électronique de technologie de l'information

LPN : Laboratoire de photonique et de nanostructures.



© CNRS Photothèque.

Les centres de compétences *C'Nano*

Des centres de compétences régionaux baptisés *C'Nano* sont en place depuis 2004. Ces structures associent les équipes et laboratoires de disciplines et d'organismes variés, actifs dans le domaine des nanosciences à l'échelle d'une région. Ils permettent de favoriser les contacts entre chercheurs, de mettre en commun les ressources, de renforcer les synergies et de susciter le lancement de projets ambitieux. Chaque centre animera plusieurs axes de recherche identifiés comme les plus fédérateurs à l'échelle régionale. Trois centres sont opérationnels depuis 2004 (Ile-de-France, Rhône-Alpes, Grand-Est) et seront suivis en 2005 par deux centres supplémentaires (Nord-Ouest et Sud-Ouest). La plupart des laboratoires associés au CNRS et engagés dans les recherches en nanosciences sont ou seront insérés dans ces centres de compétences régionaux.

L'implication internationale

Parmi les nombreuses actions internationales dans lesquelles le CNRS est engagé, son insertion dans l'Espace européen de la recherche est une priorité.

Le CNRS dans l'Europe

Depuis vingt ans, la Commission européenne favorise la compétitivité de l'Europe et maximise les coopérations transnationales. Pour soutenir la recherche et l'innovation, elle a lancé plusieurs programmes-cadres de recherche et de développement technologique (PCRD). Ces programmes permettent le développement d'une communauté scientifique véritablement européenne de très haut niveau. La croissance économique dépend de plus en plus de la recherche et un bon nombre des défis actuels auxquels l'industrie et la société sont confrontées ne peuvent plus être relevés au seul niveau national. Les compétences et l'expérience du CNRS en nanosciences lui donnent un rôle moteur dans la construction et la structuration de l'espace de recherche mondial. Sa place dans les projets de coopération internationale illustre sa force dans le domaine.

Le cinquième PCRD (1998-2002)

En 2002 s'est achevé le cinquième programme-cadre. Dans ce programme, les nanosciences n'étaient pas identifiées en tant que priorité. Cependant, de nombreux projets de nanosciences ont été soutenus, principalement dans les thématiques « société de l'information conviviale » et « croissance compétitive durable ». Ainsi, plus de 117 projets européens de recherche impliquant divers aspects des nanosciences ont été financés, avec un budget de 150 millions d'euros. 35 de ces projets impliquaient un laboratoire du CNRS. Chaque projet regroupe cinq à six laboratoires de recherche de différents pays européens travaillant en étroite collaboration sur des sujets très variés par exemple le développement instrumental, comme la nanofabrication avec des faisceaux d'ions focalisés (FIB), ou l'étude de molécules magnétiques.

Le sixième PCRD (2002-2006) et l'Espace européen de la recherche

Fortes de leur expérience, les équipes du CNRS ont répondu en grand nombre au premier appel d'offres de la priorité « nanosciences » du sixième PCRD. Plus larges que les projets du cinquième programme-cadre, les réseaux d'excellence (REX) et les projets intégrés (PI) sont les nouveaux outils dont la Commission européenne s'est dotée pour structurer durablement l'Espace européen de la recherche. La somme allouée à la priorité « nanosciences » s'élève à 1,3 milliard d'euros. Sur les 31 actions retenues pour négociations après le premier appel d'offres, le CNRS participe à 11 des 17 réseaux d'excellence et 4 des 14 projets intégrés. Le projet *Complex Metallic Alloys* (CMA) par exemple, coordonné par le CNRS, vise à organiser une communauté dans le domaine de la recherche de nouveaux matériaux métalliques et de leur développement dans des applications technologiques. À terme, son objectif est de créer un centre intégré européen de développement de la métallurgie et de la physique des matériaux (Idea). Le REX *Expanding membrane macroscale applications by exploring nanoscale material properties* (Nanomempro), également coordonné par un laboratoire du CNRS, permettra aux 122 chercheurs et aux 57 doctorants du domaine des technologies à membranes et des nanotechnologies de former un réseau européen structuré et ainsi d'être visibles voire leaders dans ce domaine, au niveau mondial.

Contexte et problématique

La réduction de la taille des objets, permettant d'explorer et d'exploiter de nouvelles propriétés de la matière, nécessite la conception et l'utilisation de nouveaux outils. C'est un des enjeux essentiels de ce domaine scientifique en pleine effervescence que de maîtriser les moyens de voir, d'analyser, de mesurer et d'agir à toutes les échelles concernées, jusqu'à la plus réduite : l'atome et son environnement immédiat.

L'homme est naturellement aveugle dans cette plongée vers l'infiniment petit ; il a besoin de loupes sans cesse plus puissantes. Les succès réguliers du CNRS dans l'amélioration des performances et l'extension des champs d'utilisation des microscopes et des sources de rayonnement variées contribuent largement à développer notre vision spatiale et spectrale à cette échelle.

C'est aussi la révolution apportée par l'intrusion des techniques utilisant l'extrémité de pointes ultrafines comme sondes locales de mesure ou de manipulations qui a transformé nos ambitions. Ces pointes constituent des « cannes d'aveugle » permettant aux chercheurs d'aujourd'hui de se mouvoir et de travailler à l'échelle du nanomètre.

Ces nouveaux outils offrent aux chercheurs la possibilité d'agir au cœur même de la matière. L'exploitation de cette nouvelle dimension leur permet d'imaginer et de préparer la mise en œuvre de nombreuses innovations comme les nanolaboratoires où seront menées en parallèle de nombreuses observations sous contraintes. On en voit d'ores et déjà les applications dans les domaines des nano-objets, des nanosystèmes ou des matériaux.

La construction d'outils d'observation et de manipulation adaptés est un préalable à l'exploration et à l'exploitation des nouvelles propriétés de la matière à l'échelle nanométrique. Le dynamisme des équipes du CNRS dans ce domaine présage déjà des nombreuses avancées à venir.

Les outils pour observer et manipuler

Grâce à une panoplie d'outils qui ne cesse de se diversifier, il est désormais possible d'obtenir des images et d'analyser des propriétés locales de matériaux et de nano-objets à l'échelle du nanomètre. Les équipes du CNRS sont fortement impliquées dans le développement de ces nouveaux outils, souvent en collaboration avec des équipes étrangères. Elles jouent un rôle moteur dans la mise en place et l'animation de réseaux européens pour la construction d'instruments d'avant-garde.

Microscopie électronique à très haute résolution

Les développements récents de la microscopie électronique en font un outil incontournable d'exploration du nanomonde qui rend possible l'analyse et la mesure des propriétés de nano-objets individuels. La barre du dixième de nanomètre a été franchie en résolution spatiale, ce qui permet d'observer et de comprendre l'organisation tridimensionnelle des atomes ainsi que ses éventuels défauts. La spectroscopie des pertes d'énergie électronique donne la possibilité d'une analyse chimique localisée à tel point que les chercheurs sont capables d'identifier un atome isolé. Les résolutions énergétiques accessibles (0,2 électronvolt) permettent d'analyser les propriétés électroniques d'une nanostructure individuelle avec une résolution presque équivalente à celle d'un synchrotron. L'importance des études consacrées aux nanotubes de carbone simples ou composites et aux nanophases solides dans l'environnement montre l'enjeu lié au développement de tels instruments.

Microscopie à effet tunnel

L'invention du microscope à effet tunnel (STM) a signé l'entrée de la science dans le nanomonde et l'essor des nanotechnologies. Pour la première fois, on a pu observer les atomes d'une surface, les manipuler, les organiser à l'aide d'une simple pointe métallique. Avec un STM, on peut élaborer, atome par atome, des nano-objets maîtrisés à l'échelle du nanomètre : molécules d'intérêt biologique, fils atomiques, nanotransistors, nano-amas magnétiques... Grâce à la spectroscopie tunnel à balayage (STS), évolution récente du STM, on peut aller plus loin que la fabrication des nanocomposants et sonder leurs propriétés électroniques nouvelles et inattendues, qui relèvent bien souvent des concepts quantiques. Cette méthode, qui consiste à mesurer la conductance tunnel en tout point de la nanostructure, peut être étendue à des pointes métalliques de nature différente qui analyseront, par exemple, les propriétés magnétiques locales. Ce nouveau champ d'activité est actuellement en plein essor.

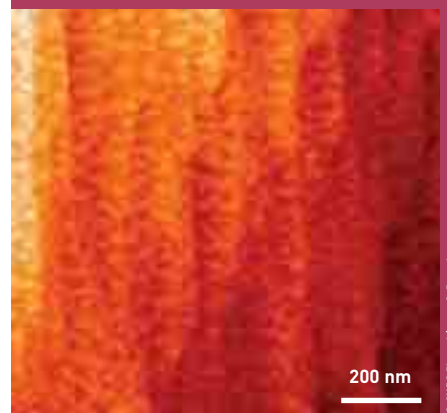
Microscopie à force électrostatique

Le microscope à force électrostatique est un outil dérivé du microscope à force atomique. Grâce à un oscillateur mécanique (une pointe oscillante qui balaye la surface à observer), ce microscope mesure les propriétés électrostatiques locales d'un matériau avec une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Il permet donc d'établir à l'échelle nanométrique des cartographies de charges électriques (avec une résolution de l'ordre de la charge d'un seul électron), ou de potentiel électrique. Avec la pointe du microscope, on peut aussi injecter des charges pour sonder et manipuler les états électroniques de nanostructures individuelles. Les chercheurs ont ainsi accès aux propriétés électroniques de couches minces diélectriques et de nano-objets (nanocristaux, nanotubes de carbone), ainsi qu'à l'analyse électrostatique de nanodispositifs.



Image par microscopie électronique à très haute résolution de nanotubes d'oxyde de titane.

© LPS/CNRS, Orsay.



Monocristal d'or observé par microscopie à effet tunnel (STM).

© CNRS Photothèque - C. Dornat.

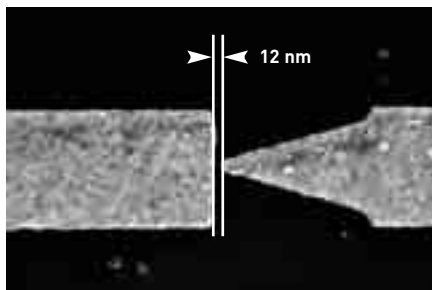


À gauche : image de microscopie à force atomique d'un nanotube de carbone. À droite : image de microscopie à force électrostatique après une expérience d'injection de charges. On peut constater l'émission de charges à l'extrémité du nanotube.

© M. Zrazek, T. Meunier/CNRS.

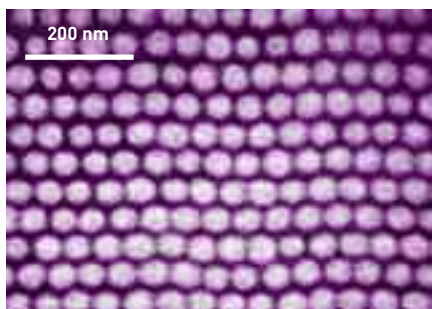
Les outils pour fabriquer

L'élaboration d'objets et de structures de taille nanométrique est indispensable à l'essor des nanosciences. Une des approches possibles, dite *top down*, consiste en l'obtention, à partir de systèmes massifs, d'objets nanométriques. Les techniques qui permettent cette structuration sont nombreuses et les constantes améliorations apportées par les chercheurs les rendent de plus en plus performantes, comme le montrent ces trois exemples.



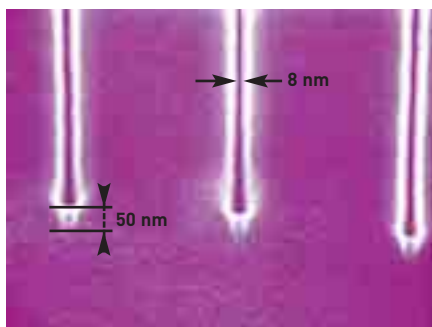
© CNRS / Grenoble.

Nanoélectrodes obtenues par nanolithographie électronique.



© LPN / CNRS.

Réseau de plots de nickel de 50 nm de diamètre et d'une période de 60 nm, réalisés par nano-impression.



© J. Gérard, C. Vieu / LPN / CNRS.

Image d'un réseau de lignes gravées par FIB qui atteignent la largeur reproductible record de 8 nm.

Nanolithographie électronique

Les techniques de lithographie par faisceaux d'électrons sont incontournables pour la réalisation de nanostructures artificielles. Un faisceau d'électrons projeté sur une surface sensible et piloté par ordinateur dessine, en suivant un trajet préalablement programmé, le motif choisi. Le matériau à lithographier est le plus souvent recouvert d'une couche mince de polymères. Les zones insolées par le faisceau sont endommagées et deviennent alors plus solubles que les parties intactes. Ces dernières forment un masque protecteur qui peut être transféré, par gravure par exemple, dans le matériau de départ. La résolution atteinte permet couramment de réaliser des motifs avec une largeur de trait d'environ 50 nm mais, en optimisant l'outil, certaines équipes, du CNRS notamment, accèdent à des tailles inférieures à 10 nm. Cette technologie peut être miniaturisée et adaptée à un microscope à force atomique.

Nano-impression (ou *nano-imprint*)

La nano-impression est une nouvelle technique de lithographie permettant de dupliquer, rapidement et à faible coût, des motifs de quelques nanomètres sur une grande surface. Elle consiste à mettre en forme une couche mince de polymère déposée sur le substrat à structurer. Un moule est appliqué sur la couche de polymère qui prend alors la forme que les chercheurs souhaitent imprimer sur le substrat. Comme dans le cas de la nanolithographie électronique, les zones encore recouvertes par le polymère sont protégées. Les motifs de la couche de polymère peuvent ainsi être transférés au substrat par gravure ionique réactive. Couplée avec des techniques courantes de microfabrication, la nano-impression permet de produire des nanocomposants de haute performance. Les surfaces couvertes de motifs nanométriques régulièrement répartis sont des structures très recherchées comme supports d'enregistrement magnétique à haute densité. Elles peuvent aussi servir comme masque de gravure pour obtenir des nanostructures photoniques, électroniques ou biologiques.

FIB (*Focused Ion Beam*)

Le système FIB, pour *Focused Ion Beam*, permet de sculpter directement des formes de taille nanométrique sur des échantillons conducteurs grâce à un faisceau d'ions focalisés. Un matériau peut ainsi être structuré sans recourir au dépôt d'une couche sensible intermédiaire, indispensable en nanolithographie classique. La structuration peut s'effectuer au choix soit par création de défauts dans la structure d'un cristal, soit par implantation d'ions, soit par gravure directe. L'expérience des chercheurs du CNRS dans ce domaine a permis de développer un système FIB innovant utilisant des ions gallium (40 kiloélectronvolts) sur une zone de très petite taille (5 à 8 nm). Le CNRS a ainsi fixé le record mondial d'écriture par gravure FIB à 8 nm et ouvert de nouvelles perspectives pour cette technologie.

Les grands instruments

Le CNRS apporte sa pierre à l'édification de l'Espace européen de la recherche en participant, avec ses homologues français, européens et internationaux, à la construction et à l'exploitation de grands équipements scientifiques. Des chercheurs de tous horizons (biologistes, physiciens, chimistes...) ont ainsi accès aux équipements les plus performants pour explorer la matière à l'échelle du nanomètre.

ESRF

Financée par dix-huit pays, l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) à Grenoble est la source de lumière synchrotron la plus puissante d'Europe. Ses faisceaux de rayons X hyperbrillants sont indispensables à une large communauté de chercheurs (5000 visites par an) pour l'étude de la matière à l'échelle atomique aussi bien dans le domaine de la physique que de la chimie, de la biologie, de la médecine, des sciences de la vie et pour l'étude des matériaux. Ces recherches, aussi fondamentales qu'appliquées, concernent particulièrement l'extraction d'informations inaccessibles par d'autres techniques, sur la structure de micro- et nano-objets. La synergie de l'expertise du CNRS pour la fabrication de nanostructures et de la puissance exceptionnelle des méthodes analytiques de l'ESRF est particulièrement propice à l'avancée des recherches en nanosciences.

Soleil

Lors de l'élaboration du projet *Soleil*, une attention particulière a été portée au développement d'outils performants d'analyse et de caractérisation de micro- et nano-objets. Une ligne de spectromicroscopie X-PEEM (*X-ray Photoelectron Emission Microscopy*) est en cours de développement. Grâce à la détection et à l'analyse des électrons émis par un échantillon lors de son excitation par des rayons X, les chercheurs pourront, en temps réel, visualiser l'évolution de la surface d'objets nanométriques et de leur composition chimique, à l'échelle de la dizaine de nanomètres. L'utilisation d'une lumière polarisée et du dichroïsme magnétique permettra, en outre, d'obtenir une image des domaines magnétiques, ce qui ouvrira de nouvelles potentialités de recherche dans le domaine des supports à haute capacité de stockage d'information. Sont par ailleurs à l'étude des techniques de lithographie profonde (LIGA) et d'analyse par microdiffraction des contraintes sur les circuits de microprocesseurs.

Nanosims 50

Le CNRS et le Muséum national d'histoire naturelle vont prochainement disposer de la dernière génération de sondes ioniques : la Nanosims 50. Cet instrument permet l'analyse de la composition chimique et isotopique des solides avec une résolution spatiale de 50 μm . À cette échelle, on peut visualiser les molécules. La Nanosims 50 permet de recueillir un grand nombre d'informations sur la composition naturelle de géomatériaux grâce à l'acquisition d'images quantitatives. Comprendre la composition intime des solides est un objectif commun à de nombreuses disciplines comme la cosmochimie, avec l'étude des météorites et des grains interplanétaires, la paléontologie, qui s'attache à comprendre notre passé grâce aux fossiles de micro-organismes vieux de plusieurs milliards d'années, ou la minéralogie. La Nanosims 50 pourra par exemple nous éclairer sur les modes d'action de molécules biologiques et sur la composition des aérosols.



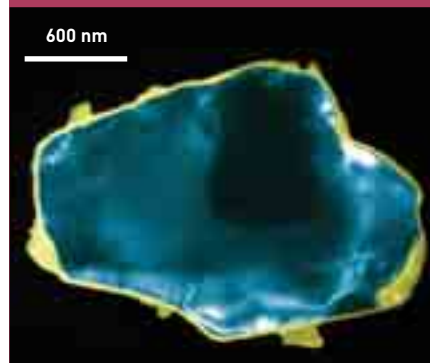
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble.

© ESRF.



Futur site de *Soleil* à Saclay. *Soleil* est un accélérateur de particules qui produit un rayonnement synchrotron.

© Atelier d'architecture Chaix et Morel et associés.



Grâce à la Nanosims 50, on peut déduire, de l'étude de ce grain du sol lunaire recouvert de sa couche de silicates amorphes, la composition ionique du vent solaire.

© F. Robert Muséum d'histoire naturelle / CNRS.

Contexte et problématique

Magnétisme et lumière ont toujours stimulé l'imagination de l'homme, qui a créé des fictions élaborées en empruntant largement au vocabulaire scientifique. Dans ces domaines, les nano-objets deviennent des réalités, tout à la fois simples dans leur définition et complexes dans leur compréhension, à l'image du monde quantique qui s'impose totalement dans les nanosciences. Émetteurs, capteurs, actionneurs sont utilisés, isolés ou intégrés avec des millions de semblables, dans les ordinateurs ou dans des objets de la vie courante qui s'imprègnent de plus en plus de technologie très élaborée, fiable, robuste et peu consommatrice d'énergie, à l'image des feux de circulation par exemple.

Organisé en réseau, le nano-objet aimanté, porteur du bit « 0 » ou « 1 », augmente la puissance de mémoires devenues en outre beaucoup moins consommatrices d'énergie. Alors que l'aimantation du matériau magnétique massif est dominée par les défauts et leurs interactions, la petite particule magnétique présente les propriétés intrinsèques des grandes interactions fondamentales de l'échange et de l'anisotropie.

Les microcavités, véritables cages à lumière nanométriques, produisent des nanolasers et débouchent sur une façon nouvelle d'aborder la connexion électrique sur puces. Le gaz d'électrons bidimensionnel, confiné sur une taille de moins de 100 nm, peut résonner à la manière d'une flûte à des fréquences autour du terahertz. Ce domaine encore peu exploré à la jonction de la lumière et des radiofréquences sera stratégique, entre autres, pour le contrôle de la fraîcheur alimentaire.

À la jonction du monde organique et inorganique, le carbone est un grand pourvoyeur de nano-objets. Après le fullerène, ballon de football nanométrique, le nanotube est venu enrichir la panoplie pour former des squelettes qui donneront naissance aussi bien à des nouveaux matériaux bio-inspirés qu'à des émetteurs d'électrons efficaces pour les futurs écrans plats. Le nanotube de carbone a été source d'inspiration pour créer d'autres nanotubes plus attirants encore, faits de semi-conducteurs III-V de l'optoélectronique.

Nano-objets carbonés

Fabriqués avec des rendements sans cesse améliorés, les nano-objets carbonés sont au cœur de nombreuses recherches. Présents pour certains dans le milieu interstellaire, leurs propriétés exceptionnelles laissent entrevoir aux chercheurs leurs très nombreuses applications.

Nanotubes de carbone et fullerènes

Les fullerènes et les nanotubes de carbone sont de très petites molécules formées exclusivement d'atomes de carbone. Les fullerènes sont sphériques. Le plus courant des fullerènes est composé de 60 atomes et a un diamètre de 0,7 nm tandis que les nanotubes de carbone ont une forme de tube très allongé, d'1 nm sur plusieurs centaines de micromètres. La nature des liaisons entre les atomes de carbone est très proche de celle du graphite. Associée à l'effet de taille, elle confère aux nanotubes une cohésion et des propriétés mécaniques, électroniques et thermiques exceptionnelles. Depuis leur découverte, le CNRS s'est mobilisé autour de ces nouveaux objets. Plusieurs nouveaux groupements de recherche ont été mis en place, des études interdisciplinaires ont été lancées afin de répondre aux nombreuses questions suscitées par ces nano-objets. Comment peut-on les synthétiser et les organiser ? Quelles sont leurs applications possibles dans le domaine de l'électronique et de l'émission de champ ou dans celui de l'élaboration de nouveaux matériaux ? Comment utiliser leur réactivité chimique ou leur capacité à stocker de l'énergie ? L'avancée rapide des recherches a permis de finaliser la création d'une start-up, Nanoledge, focalisée sur la production de systèmes à base de nanotubes. Très récemment, le CNRS a mis en place une unité mixte de recherche européenne, structure de coordination articulée autour de quatre priorités : contrôle de la croissance et maîtrise des caractéristiques, des composants pour la nanoélectronique et l'émission de champ, fonctionnalisation et dispersabilité, impact environnemental et interaction avec le vivant. Elle sera certainement le moteur d'importantes avancées dans le domaine.

Nanoparticules stellaires et interstellaires

De nombreux nano-objets sont présents dans la matière interstellaire. Ils sont constitués de particules de taille nanométrique (entre 1 et 20 nm) produites à la fin de la vie des étoiles ou à l'issue d'une cascade de processus chimiques dans les nuages interstellaires. Pour l'astrophysicien, il est essentiel de caractériser ces particules et de préciser leur rôle dans des processus physico-chimiques comme ceux qui gouvernent la formation des étoiles et des systèmes planétaires. Plusieurs équipes de recherche tentent d'élucider leur composition par l'analyse de données infrarouges fournies par les observatoires spatiaux. Ces particules peuvent être des agrégats de macromolécules aromatiques, des nanodiamants, des nanoparticules de silicates ou de métal. D'autres équipes du CNRS cherchent à extraire directement des nanoparticules de météorites ou de particules de poussière interplanétaires extraterrestres. Enfin, des dispositifs expérimentaux complexes permettent de reproduire les conditions du milieu interstellaire et ainsi d'étudier la formation de ces nano-objets, leur réaction au rayonnement ultraviolet et leurs propriétés catalytiques lors de la formation de molécules complexes voire prébiotiques (pré-existantes à l'apparition de la vie). Ces recherches se développent dans un contexte interdisciplinaire fortement favorisé au CNRS et impliquant des astrophysiciens, des physiciens, des géochimistes et des chimistes.



Nanotubes de carbone.

© GDPC/CNRS - Université Montpellier 2.

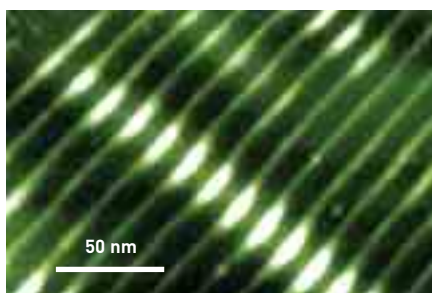


Expérience PIRENEA dédiée à l'étude des propriétés physico-chimiques de nano-objets d'intérêt astrophysique.

© P. Dumas CESR/CNRS-UPS.

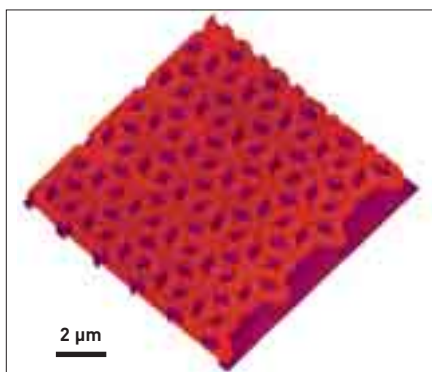
Nanostructures semiconductrices

Le développement récent des techniques de nanofabrication permet de créer des systèmes artificiels dans lesquels certains phénomènes fondamentaux de physique, jusque-là réservés à la physique atomique, deviennent pertinents à étudier dans les solides. Ces systèmes suscitent un intérêt fondamental car ils concrétisent des situations physiques théoriques et permettent d'explorer le rôle des interactions dans des situations idéales et ainsi d'introduire des concepts nouveaux. Les structures fabriquées aujourd'hui sont susceptibles d'applications importantes pour les ordinateurs quantiques et la nanoélectronique.



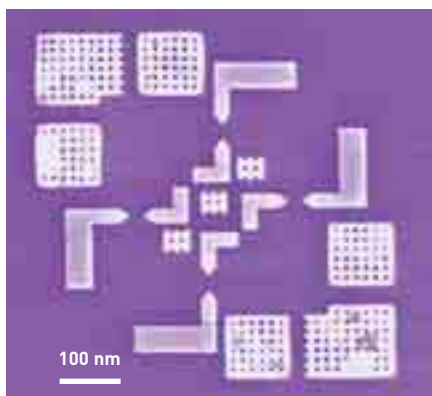
© LPN/ICM/CNRS.

Vue en coupe par microscopie à effet tunnel d'un ensemble de boîtes quantiques.



© D. Mailly LPN/CNRS.

Réseau gravé dans une structure qui induit la localisation des électrons par effet d'interférence quantique.



© D. Mailly LPN/CNRS.

Vue au microscope électronique d'un dispositif expérimental formé de contacts ohmiques et de grilles pour mesurer les corrélations quantiques d'électrons confinés dans un anneau.

Boîtes quantiques de semiconducteurs

Les composants optoélectroniques (dont les diodes laser) utilisent aujourd'hui une couche semiconductrice très fine ou « puits quantique » comme matériau actif. Le CNRS développe des boîtes quantiques, constituées par des inclusions de taille nanométrique d'un semiconducteur dans un autre. Ces nano-objets permettent de confiner fortement les électrons dans les trois directions de l'espace et présentent de ce fait, comme les atomes, des états électroniques discrets et des raies d'émission lumineuse très étroites. Par ailleurs, la longueur d'onde d'émission d'une boîte quantique dépend du nombre d'électrons qu'elle contient, à cause de la forte interaction de Coulomb entre électrons piégés. Les chercheurs du CNRS ont récemment exploité ces deux propriétés très spécifiques pour réaliser la première source monomode de photons uniques. Ce composant, capable d'émettre de façon parfaitement contrôlée des photons un par un, permettra en particulier de développer des systèmes de communication parfaitement sûrs basés sur la cryptographie quantique.

Transport quantique dans les semiconducteurs

Lors du déplacement d'un électron dans la matière, il y a interférence entre toutes les trajectoires possibles: c'est le résultat du principe de superposition de la physique quantique. Pour étudier ces phénomènes, les chercheurs du CNRS les observent dans un matériau de taille micro-métrique et nanostructuré, à très basse température ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$). L'utilisation de semiconducteurs apporte en plus la possibilité, grâce à des grilles électrostatiques, de moduler la géométrie de ce matériau ainsi que ses caractéristiques. De nombreuses prédictions théoriques de la mécanique quantique ont ainsi pu être vérifiées, comme les oscillations de la résistance en fonction du flux magnétique dans un anneau (effet Aharonov-Bohm), la présence d'un courant permanent dans un anneau non supraconducteur ou la quantification de la conductance à travers une constriction.

Transport balistique

Le raffinement des techniques de croissance de nanostructures permet de disposer de gaz d'électrons bidimensionnels de très grande mobilité. Ces gaz ont permis de mettre en évidence un nouvel état du gaz d'électrons: l'effet Hall quantique fractionnaire. On peut également atteindre dans des nanostructures un régime où les électrons se propagent sans faire de collisions autrement qu'avec les bords de l'échantillon: c'est le régime balistique. En construisant des structures très proches des systèmes modèles utilisés par les théoriciens, les chercheurs les vérifient. Ainsi, la localisation induite par la géométrie dans des réseaux de topologie complexe a été observée. Il est également possible de réaliser des microbillards dans lesquels on injecte des électrons balistiques. La nature quantique de ces particules apporte une richesse de phénomènes traités, par exemple, dans les théories du chaos quantique.

Nano-objets magnétiques

Les nano-objets magnétiques ou les réseaux de nano-objets magnétiques constituent des axes de recherche importants au CNRS. La maîtrise de leur réalisation est un préalable non seulement à la découverte d'effets physiques mais aussi à l'élaboration de matériaux aux propriétés spécifiques qui pourront, par exemple, permettre la création de systèmes d'enregistrement plus performants.

Synthèse de nano-objets magnétiques

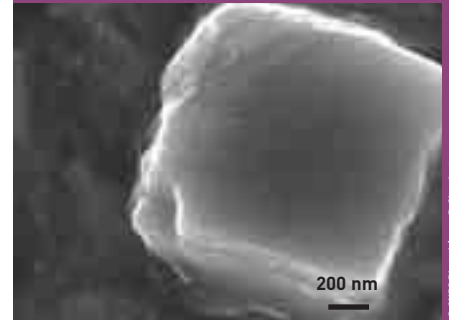
Une équipe CNRS-Insa-Motorola SPS a mis au point une méthode originale de synthèse de nano-objets magnétiques qui permet, en empêchant l'oxydation à la surface des particules magnétiques de fer ou de cobalt, de choisir la forme et la taille du nano-objet. Une molécule organométallique est décomposée, sous hydrogène, en très petites particules métalliques sphériques (1,5 à 5 nm) qui présentent des structures originales et un excès d'aimantation comparé au métal massif. Ces nanoparticules se compactent pour donner, dans le cas du cobalt, des nanofils ferromagnétiques à température ambiante et dans le cas du fer, des nanocubes qui s'organisent en superstructures (cubes de cubes). L'avenir de ces nano-objets magnétiques est plus que prometteur aussi bien dans le domaine de l'enregistrement magnétique que de la téléphonie mobile.

Nanostructuration magnétique

Savoir dessiner, de manière simple et économique, des réseaux denses de nanostructures magnétiques aux propriétés parfaitement contrôlées sur des surfaces de quelques centimètres carrés est un défi majeur de recherche fondamentale pluridisciplinaire qui mobilise des physiciens et des chimistes du CNRS. Les nombreuses techniques développées actuellement permettront de soutenir le rythme de croissance de la densité d'enregistrement magnétique qui double tous les ans depuis 1998. Outre l'auto-organisation, avec laquelle des résultats probants ont déjà été obtenus, l'irradiation de multicouches ou d'alliages magnétiques par faisceaux d'ions est très prometteuse. Directe ou à travers un masque, elle permet de moduler les propriétés magnétiques avec une extrême précision. Elle est utilisée pour la transformation d'un alliage désordonné en alliage ordonné. Cette technique d'irradiation ne nécessite que des températures modérées, ce qui la rend compatible avec les processus industriels.

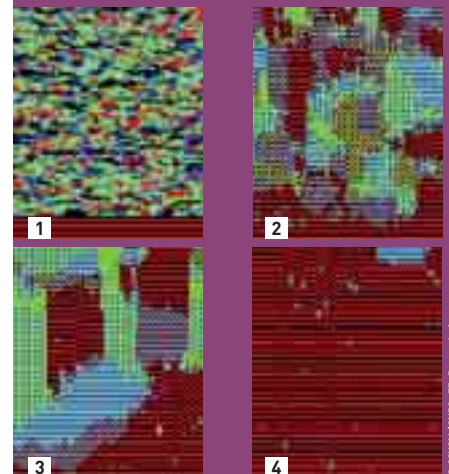
Nanomagnétisme à l'échelle de la cellule vivante

L'utilisation de nano-objets magnétiques dans des cellules vivantes est un exemple de leurs nombreuses applications possibles. Ils s'insèrent très efficacement au cœur des cellules grâce à une interaction forte avec leur membrane (adsorption d'origine électrostatique) suivie d'une internalisation par un processus spontané d'endocytose. Les chercheurs disposent alors de « cellules magnétiques ». Les nouvelles propriétés de ces cellules permettent soit de les trier magnétiquement selon leur type, soit, dans le cas de cellules d'intérêt thérapeutique, de les guider vers un endroit précis de l'organisme. De plus, ces cellules magnétiques peuvent être suivies en temps réel par IRM, avancée majeure pour l'émergence de nouvelles techniques de thérapie cellulaire.



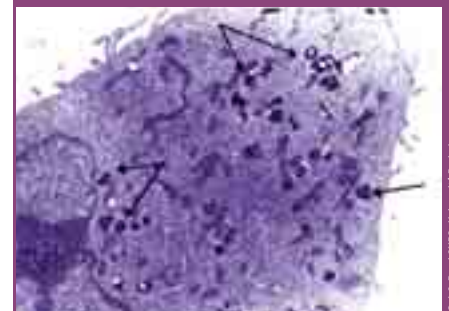
© CNRS Photographie - B. Chaudret.

Vue en microscopie électronique à balayage de nanocubes de fer organisés au sein d'un super-réseau (cube de cubes).



© CSMW / CNRS - PZ. Rosenthal.

Mise en ordre progressive sous irradiation d'un alliage de fer et de platine.

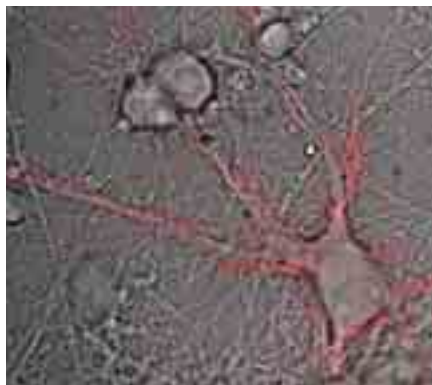


© J.-C. Bacri / CNRS - Université Paris 6.

Cellule magnétique observée au microscope électronique : chaque petite sphère (flèches) est remplie de nanoparticules magnétiques. Ce marquage n'altère ni la viabilité, ni les capacités fonctionnelles de la cellule.

Nano-objets pour la biologie

Nanosciences et biologie sont intrinsèquement liées, ne serait-ce qu'en raison de la taille nanométrique des macromolécules biologiques. Les nouveaux outils de recherche issus des nanosciences permettent un suivi du fonctionnement des cellules vivantes inégalé par les approches plus classiques. Par ailleurs, la cellule vivante est riche en nano-objets que l'on peut étudier avec les techniques des nanosciences afin d'obtenir une nouvelle description du fonctionnement des machineries cellulaires. Des équipes du CNRS sont bien engagées dans ces voies et ont produit des résultats remarquables.



© M. Dahhan LMB/CHRS et S. Lévi BCS/INSERM.

Observation de protéines du système nerveux grâce à des nanocristaux semiconducteurs (ici en rouge).



© LPS/FENS-CNRS-Universités Paris 6 et 7.

Des microbilles magnétiques, ancrées par l'intermédiaire d'une molécule d'ADN à la surface d'un capillaire, sont observées par un microscope inversé.



© CNRS/Institut Curie.

Réseau de nanotubes issus d'une vésicule géante en microscopie de fluorescence.

Nanocristaux semiconducteurs

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des cellules, il est essentiel de déterminer la dynamique des processus biologiques. À cet égard, les progrès récents en nanomatériaux ouvrent des perspectives tout à fait nouvelles. Ainsi certains nanocristaux semiconducteurs peuvent être assez facilement accrochés à des molécules biologiques. Ce sont des émetteurs de lumière remarquables que l'on peut suivre individuellement. Grâce à cette technique, les chercheurs du CNRS et de l'Inserm ont pu observer avec une netteté sans précédent le mouvement de protéines impliquées dans la transmission du signal nerveux. À terme, en rendant possible l'imagerie cellulaire ultrasensible, ces nanosondes vont permettre d'explorer de nombreux processus biologiques avec un œil nouveau.

Étude des interactions ADN/protéines à l'échelle de la molécule unique

Le CNRS a développé une technique originale qui permet d'étudier l'interaction d'une enzyme unique avec une molécule d'ADN. Cette détection à l'échelle d'une molécule s'affranchit ainsi de la perte de résolution inévitable d'une observation classique, en volume, où c'est le comportement moyen d'une population d'enzymes qui est observé. En associant une molécule d'ADN fixée sur un support à une microbille magnétique, les chercheurs ont pu tirer et tordre l'ADN grâce à une pince constituée de petits aimants. Dans un premier temps, cette technique a permis de confronter les propriétés élastiques prédites par les modèles théoriques avec les observations. En s'appuyant sur ces propriétés élastiques, il devient possible de repérer un changement même minime de l'extension d'une molécule d'ADN provoqué, par exemple, par son interaction avec une enzyme unique. Cette technique a permis d'étudier la dynamique et de mieux comprendre le mécanisme d'action d'un grand nombre d'enzymes (topoisomérases, hélicases, ADN et ARN polymérases...) dont le dysfonctionnement accompagne souvent des pathologies cancéreuses ou génétiques.

Nanotubes de membrane

La communication entre les différents compartiments constituant l'intérieur de la cellule est essentielle à son bon fonctionnement. Cette fonction est assurée en partie par de fins tubes de membrane qui permettent le transport ciblé de molécules et donc d'informations. Pour dégager les mécanismes essentiels et les paramètres physiques importants régulant ce phénomène, des biologistes et des physiciens de laboratoires CNRS à l'Institut Curie ont reconstitué *in vitro* un système modèle de nanotubes de membrane tirés par des moteurs moléculaires. Ce système biomimétique permet non seulement de mieux comprendre les mécanismes de transport intracellulaire, mais la maîtrise de leur formation et de leur dynamique permet aussi d'imaginer des applications particulièrement intéressantes pour les nanosciences. De longs nanotubes de membrane pourraient par exemple former des réseaux et transporter des fluides vers des microréacteurs.

Nano-objets pour la photonique

Les systèmes optiques sont très utilisés dans les domaines du traitement de l'information et de la communication optique. Cependant, la miniaturisation des dispositifs optiques classiques atteint ses limites. Pour faire sauter ce verrou technologique, le CNRS élabore de nouveaux concepts susceptibles de produire des ruptures technologiques à moyen et long termes et dont les retombées scientifiques et applicatives soulèvent actuellement un grand intérêt.

Microcavités

Les microcavités optiques sont des minuscules cages à lumière aux parois réfléchissantes, mesurant quelques centaines de nanomètres. Lorsqu'un émetteur de lumière est placé dans une microcavité, les nouveaux phénomènes optiques qui apparaissent permettent de maîtriser le débit et la direction de l'émission. Plusieurs laboratoires du CNRS explorent les phénomènes mis en jeu dans ces structures et fabriquent des microcavités, grâce à des procédés de nanotechnologie, à partir de semiconducteurs, de polymères, ou d'autres matériaux. Des retombées novatrices sont attendues dans la réalisation de nanosources de lumière extrêmement efficaces (des nanolasers) qui pourront être intégrées dans des nanocircuits photoniques.

Cristaux photoniques

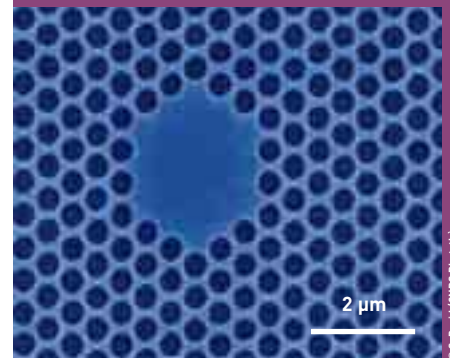
Un cristal photonique est un matériau sur lequel sont gravés des motifs répétitifs et qui permet de guider, capter ou filtrer la lumière. L'idée d'utiliser la répétition de motifs en deux, voire trois dimensions afin de piéger la lumière est née dès 1987, déclenchant une course exaltante à la réalisation de réseaux de trous fins, d'empilements de nanosphères ou de nanobûchettes. À la clé, la réalisation d'architectures ultraminiaturisées pour des dispositifs de télécommunications ou des senseurs biologiques. Loger des sources de lumière au sein même de ces structures permettra de les doter de multiples fonctions. Les applications de ces futurs microcomposants optiques s'étendent du chauffage par rayonnement jusqu'aux diodes super électroluminescentes (LEDs), ces petits voyants qui envahissent nos gadgets portables et qui pourraient supplanter avantageusement les classiques lampes d'Edison ou les tubes fluorescents.

Nanostructures métalliques pour l'optique

Sous certaines conditions, connues sous le nom de « conditions de résonance de plasmon de surface », les micro- et nanostructures métalliques confinent fortement les champs électromagnétiques de la lumière visible ou proche infrarouge. Sous forme de guides de plasmons, ces structures métalliques autorisent donc la propagation non seulement de la lumière mais aussi de signaux électriques. La combinaison de ces deux propriétés sur le même support matériel permet d'envisager la conception de microsystèmes aux caractéristiques inédites regroupant des composants de guidage de la lumière et de nombreuses connexions électriques. Ces structures pourraient être particulièrement utiles pour le développement de composants pour les télécommunications et de nouveaux types de capteurs biologiques. Les chercheurs d'une équipe Université de Bourgogne/CNRS coordonnent sur ces thèmes le réseau d'excellence européen « Plasmo-Nano-Devices ».



Microcavités à semiconducteur. L'alternance de deux matériaux dans la même direction verticale forme le miroir et confine la lumière dans le « corps » de la cavité située au centre.



Défaut hexagonal dans un cristal photonique.



Fonctionnalité optique d'un ruban en or de 40 nm d'épaisseur.

Contexte et problématique

Dans un contexte de recherches interdisciplinaires, les chercheurs du CNRS exploitent les nouvelles potentialités d'obtention et de manipulation de nano-objets en les organisant en architectures originales, appelées nanosystèmes. Leur structure et les phénomènes particuliers qui en résultent permettent aux chercheurs de les doter de nouvelles fonctions.

La conception d'un nanosystème nécessite une méthodologie mixte ascendante et descendante alors que de façon usuelle, un système est conçu à partir d'une approche descendante. Cette différence, qui peut paraître anodine au premier abord, est une véritable révolution scientifique. Elle impose une nouvelle approche des systèmes qui consiste à développer des architectures ne résultant pas de l'association de blocs déjà pré-établis. Cette méthodologie mixte ascendante et descendante permet d'augmenter les degrés de liberté des concepteurs et sera donc à l'origine d'innovations nombreuses et majeures.

Les nanosystèmes vont permettre aux scientifiques d'aller sonder des champs jusqu'alors inconnus comme l'exploitation des interactions moléculaires à la fois au niveau mécanique, chimique et électrique. Dans le domaine des sciences du vivant, ils vont permettre de développer de nouveaux types de capteurs voire de nouvelles méthodes de caractérisation à l'échelle moléculaire qui auront des répercussions à la fois scientifiques et sociétales. Dans le domaine du traitement de l'information, des capteurs aux résolutions améliorées et de nouvelles architectures de systèmes de stockage vont naître des nouveaux concepts de composants exploitant les interactions quantiques entre électrons et matière ou entre lumière et matière. Enfin, l'augmentation de la densité d'intégration est un des principaux enjeux de ces prochaines années. Sur une puce de plus en plus petite, que l'on compare alors à une poussière intelligente ou à un véritable laboratoire sur puce, seront associées plusieurs fonctions de traitement de l'information, de gestion de l'énergie et de communication.

La fabrication de ces nanosystèmes nécessite un enchaînement d'étapes technologiques complexes, une « architecture de procédés technologiques » qui impose des recherches fondamentales en technologie et le développement de véritables filières technologiques. Par ailleurs, les deux axes stratégiques que sont la conception et la caractérisation des nanosystèmes sont deux thèmes qui sont développés par le CNRS afin d'explorer de façon exhaustive ce fantastique champ de recherche.

Les molécules-machines

Aucun principe de la physique ni aucune loi de la chimie n'obligent les machines à avoir une taille macroscopique. Grâce à la possibilité, découverte au début des années 90, de manipuler un atome ou une molécule avec la pointe d'un microscope à effet tunnel, chimistes et physiciens ont pu s'attaquer aux limites de la miniaturisation en concevant, synthétisant et étudiant des machines de la taille d'une seule molécule. Ces molécules-machines seront peut-être les calculateurs, mémoires, robots ou transducteurs de l'avenir.

Moteurs moléculaires

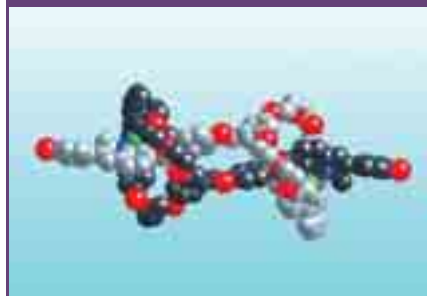
Les processus biologiques font intervenir des moteurs moléculaires « naturels ». Ces moteurs sont constitués de protéines dont la mise en mouvement est le plus souvent déclenchée par l'hydrolyse d'ATP (le « carburant » biologique). Pour le chimiste de synthèse, l'élaboration de molécules totalement artificielles dont le comportement rappelle celui des systèmes biologiques, mais qui sont de plus petite taille, est un défi formidable. Il doit être possible de mettre en mouvement une partie du composé ou d'un assemblage de molécules par l'intervention d'un signal envoyé de l'extérieur alors que d'autres parties restent immobiles. Au CNRS, des équipes de chimistes ont synthétisé des moteurs rotatifs minuscules, des moteurs linéaires mis en mouvement par un signal électronique ou des « muscles » moléculaires de synthèse capables de se contracter ou de s'allonger sous l'action d'un stimulus externe.

Nanocamions moléculaires

La famille des molécules nommées *Landers* (ou camions moléculaires) a récemment été synthétisée au CNRS. Ces molécules sont destinées à des études de surface par microscopie à effet tunnel (STM). Elles sont constituées d'un châssis central rigide (la partie active de la molécule, en rouge sur la figure b) et de 4 à 8 pieds (ou roues) qui séparent ce châssis de la surface afin de conserver ses propriétés et de faciliter le déplacement de la molécule. Chaque fois qu'un composant du circuit est situé à bonne hauteur au-dessus du substrat, le nanocamion s'y fixe. Ces nanocamions ont permis un suivi très fin de la mécanique intramoléculaire lors de leur manipulation à l'unité par la pointe du STM. Ils ont également la particularité de reconstruire la surface de certains métaux en stabilisant sous le châssis, entre leurs roues, des nanofils métalliques. Il s'agit des premiers pas d'une technique atomique pour l'électronique moléculaire.

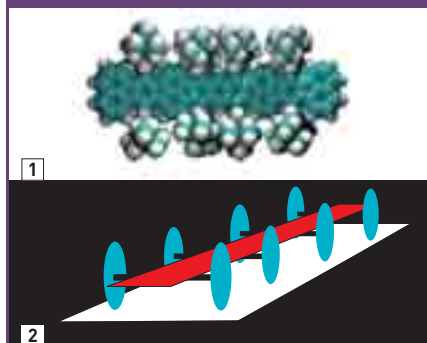
Commutateur monomoléculaire de surface

La résolution spatiale extrême, inférieure à 10 picomètres (0,01 nanomètre), du STM à basse température permet de faire des expériences à l'intérieur d'une molécule unique et de réaliser des dispositifs moléculaires complètement inédits n'utilisant qu'une seule molécule. Le CNRS a ainsi pu réaliser un commutateur moléculaire à partir d'une molécule de biphenyl adsorbée sur une surface de silicium. Le basculement de cette construction peut être activé par excitation électronique à l'aide de la pointe du STM. Suivant l'endroit où est pratiquée cette excitation dans la molécule, les chercheurs, en travaillant avec une précision spatiale très nettement sub-moléculaire, peuvent contrôler l'excitation électronique et donc la dynamique de basculement du commutateur.



Structure obtenue par rayon X d'un « muscle » moléculaire.

© J. P. Sauvage ICI/CNRS.

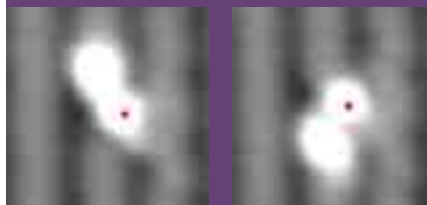


© S. Gauthier, T. Zambelli, CEMES/CNRS.



© S. Gauthier, T. Zambelli, CEMES/CNRS.

1 Modèle d'un nanocamion moléculaire.
2 Concept.
3 Image STM de camions moléculaires à 8 pieds garés le long de marches mono-atomiques à la surface du cuivre.

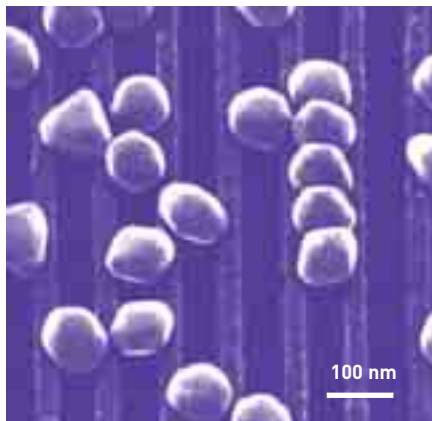


© M. Lestapié LPM/CNRS.

Basculement sur la surface de silicium du commutateur après son excitation par un courant tunnel.

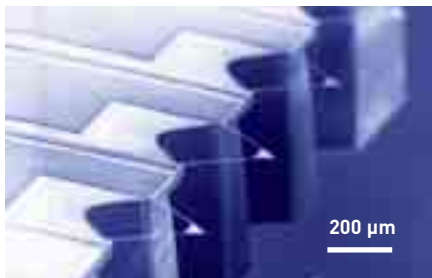
Nanosystèmes pour la biologie

Les nouveaux capteurs nanométriques constituent des outils de choix face à un des enjeux actuels de la biologie : obtenir des systèmes qui, grâce à leur taille, offrent la possibilité d'effectuer simultanément un très grand nombre de détections ultrasensibles, à l'échelle de la molécule. La mise au point de ces méthodes massivement parallèles qui sous-tendent des enjeux économiques importants, en particulier dans le domaine de la génomique, représente une gageure pour la recherche amont. Pour atteindre ces objectifs, le CNRS mène depuis plusieurs années une action de valorisation dans ce domaine, qui lui a permis de déposer plusieurs brevets significatifs.



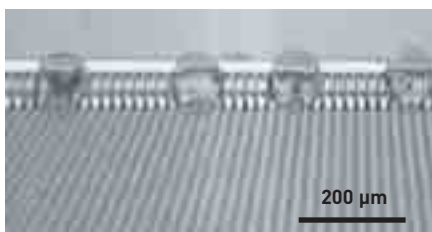
© C. Vieu LAAS / CNRS.

Nanoélectrodes de 30 nm de large pontées par des nanobilles d'or de 90 nm de diamètre.



© C. Bergaud LAAS / CNRS.

Nanoleviers piézorésistifs.



DR.

Dépôt de microgouttelettes contenant de l'ADN sur un réseau de transistors à effet de champ.

Détection électrique avec nanobilles

Détecter l'interaction entre des biomolécules avec un nanosystème ultrasensible intégrable sur une puce constitue un enjeu considérable pour le développement d'instruments miniaturisés capables de réaliser des dosages biologiques, des criblages de médicaments, des capteurs pour l'environnement ou pour la sécurité alimentaire. Le CNRS développe un nanosystème capable de convertir l'affinité spécifique entre deux protéines en un signal électrique. La prouesse technologique réside dans l'obtention de nanoélectrodes interdigitées, dont la taille est comparable à celle des biomolécules, et qui permettent d'atteindre une sensibilité proche de la molécule unique. La fixation de nanobilles métalliques greffées aux protéines sur ces électrodes permet d'exalter la réponse électrique. Grâce à cette miniaturisation, le diagnostic précoce en cancérologie peut devenir ultrasensible.

Nanoleviers pour la détection biologique

La détection de molécules présentes, même en très faible quantité, dans un volume de liquide inférieur au nanolitre est possible grâce à l'utilisation de nanoleviers : la présence d'une molécule se traduit par sa fixation sur le nanolevier, ce qui entraîne une vibration ou un changement de sa fréquence de résonance. Une équipe du CNRS a réussi à augmenter considérablement la sensibilité de cette technique en structurant la surface de nanoleviers avec des nanoparticules ou des couches de biomolécules actives. Elle a aussi mis au point des méthodes intégrées, qui facilitent l'accès au résultat en s'affranchissant des étapes de détection optique externe classiques. L'émergence des techniques de fabrication massives de nano-objets permet la réduction du coût de ces dispositifs et rend ainsi possible l'utilisation de ce type de nanodétecteurs pour le diagnostic médical. Cette biotechnologie est en pleine émergence depuis quelques années avec trois brevets en cours d'extensions internationales.

Détection électronique de l'ADN sur réseau de transistors

Une équipe de physiciens du CNRS, de l'École normale supérieure et des universités Paris 6 et 7 a rendu possible la détection purement électronique d'ADN grâce à l'utilisation d'un réseau d'une centaine de transistors en silicium ayant chacun quelques micromètres de surface active. Quand les transistors sont en contact avec les biomolécules, leur caractéristique électronique varie en fonction de la charge de la biomolécule. Les chercheurs ont ainsi pu réaliser, avec des biologistes de l'Institut Pasteur, un test de détection de l'une des mutations pathogènes les plus fréquentes du génome humain et responsable de la surdité héréditaire de l'enfant. Cette technique a de nombreuses autres applications potentielles : détection des biomolécules sans marquage, miniaturisation à l'échelle du micromètre, analyse d'un très grand nombre d'échantillons en parallèle, création de dispositifs de type « laboratoire sur puce »...

Nanocircuits photoniques

Les réseaux optiques de communication actuels n'exploitent pas encore, loin s'en faut, toutes les potentialités du domaine de l'optique. Pourtant, disposer de circuits photoniques conduirait à une amélioration considérable des performances de ces réseaux. Le CNRS explore chaque voie susceptible de permettre aux chercheurs de contourner les verrous technologiques qui empêchent l'essor de la nano-optique intégrée.

Vers des circuits intégrés photoniques

Élaborer un circuit complètement basé sur le traitement de la lumière pourrait permettre de disposer de circuits plus fiables, une alternative prometteuse aux circuits électroniques qui sont sujets à de nombreuses limitations. Toutefois, l'intégration d'un système optique sur une seule puce reste un enjeu qui apparaissait encore inaccessible en l'absence de concept et de procédé de fabrication génériques. L'émergence des cristaux photoniques et leur exploitation par la structuration planaire et bidimensionnelle d'un guide d'onde à confinement vertical offrent une voie nouvelle vers des circuits intégrés photoniques comportant des composants à l'échelle de la longueur d'onde et façonnés sur mesure par une ingénierie des modes optiques. La disponibilité de nanosources intégrables et à faible consommation reste le dernier rempart à cet objectif.

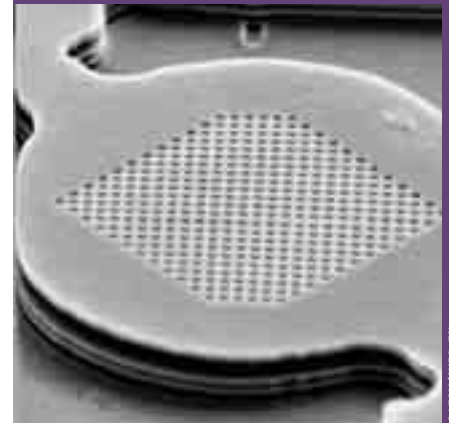
Fibres à cristal photonique

Les fibres photoniques permettent de guider la lumière et donc de transmettre un signal, une information. Des fibres de nouvelle génération, les fibres à cristal photonique, guident la lumière grâce à leurs propriétés géométriques. Des canaux d'air courent le long des fibres. C'est leur répartition périodique qui détermine pour quelles longueurs d'onde la propagation de la lumière est permise ou non. L'arrangement de ces canaux et l'introduction de ruptures de leur périodicité offrent des propriétés encore à peine exploitées telles que le guidage dans un cœur en air. Ces fibres, qui permettent de compenser la dispersion des fibres conventionnelles et de repousser le seuil d'apparition des effets non linéaires, intéressent particulièrement les systèmes de transmission à haut débit. Elles ouvrent aussi un large champ d'innovation balbutiant : transport de faisceaux de forte puissance, propagation d'impulsions femtosecondes sur de longues distances, génération de supercontinuum, guidage d'atomes et de molécules par pression de radiation.

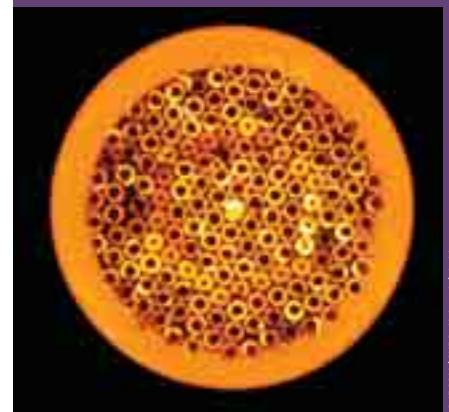
Émergence de fonctionnalités optiques révolutionnaires

Grâce à la maîtrise de procédés de fabrication des nanostructures optiques, des nouveaux matériaux aux propriétés physiques encore inconnues dans la nature pourraient révolutionner l'instrumentation optique et l'imagerie. Ainsi, les chercheurs du CNRS tentent de démontrer l'existence de matériaux « main gauche » dans lesquels la lumière se réfracte selon une direction non prévue par les lois classiques de la réfraction. Ces matériaux pourraient conduire à la fabrication de lentilles plates procurant une image dont la résolution ne serait plus limitée par la diffraction de la lumière.

De même, les sources de lumière à base de nanocristaux de silicium sont susceptibles de conduire à l'émergence de circuits photoniques en silicium et de permettre une avancée considérable pour la réunion de la microélectronique et la nanophotonique. Au delà de leur intérêt pour les interconnexions optiques ou le routage tout optique, leur association avec d'autres matériaux, par exemple organiques ou biologiques, pourrait bouleverser les secteurs d'applications des techniques médicales et des biocapteurs.



Structure photonique : empilement de membranes de semiconducteurs qui comportent un réseau de trous et de fentes de périodes submicroniques.



Préforme permettant l'obtention d'une fibre optique.



Structures photoniques pour la génération et le traitement optique résolu spectralement et angulairement.

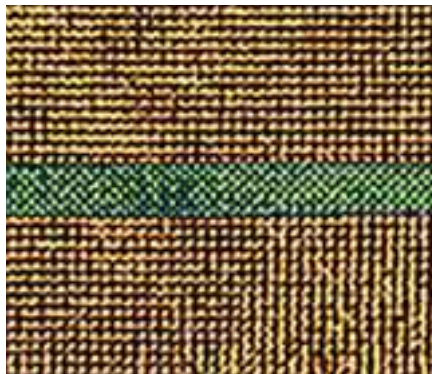
© LEMO/CNRS-ECL

© IRCOM/CNRS - Université de Limoges

© LEMO/CNRS-ECL

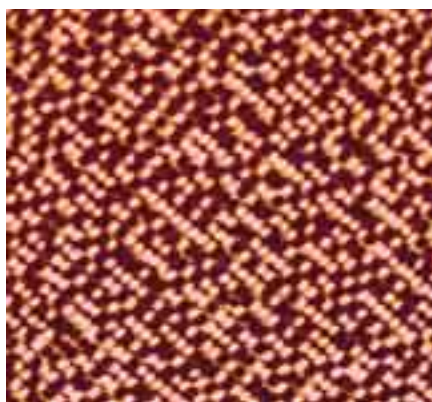
Spintronique

L'électronique de spin exploite une caractéristique quantique de l'électron : le spin, que l'on peut imaginer comme un moment magnétique (minuscule aimant) associé à la rotation permanente de l'électron sur lui-même. Alors que l'électronique classique exerce une force sur la charge des électrons pour les déplacer, la spintronique agit sur leur spin. Ce levier supplémentaire amène de nouveaux effets et de nouvelles potentialités qui sont déjà exploités dans les technologies actuelles (têtes de lecture des disques durs...).



© CNRS Photothèque / Thales - J.-L. Maurice.

Jonction tunnel magnétorésistive vue en coupe par microscopie électronique haute résolution.



© J. Moritz Spitzer / CEA - CNRS.

Réseau de plots magnétiques pour l'enregistrement ultrahaute densité.



© CNRS Photothèque / Thales.

Jonctions tunnel magnétiques submicroniques.

Dispositifs à magnétorésistance géante (GMR)

Une nouvelle génération de capteurs magnétiques beaucoup plus sensibles est née de l'utilisation de l'effet GMR, découvert en France en 1988. Cet effet, observé dans des structures sandwich comprenant deux couches magnétiques ultraminces séparées par une couche non magnétique, se traduit par une très forte variation de la résistance électrique lorsque la configuration magnétique des deux aimantations (parallèle ou antiparallèle) est modifiée par l'application d'un champ magnétique. Depuis 1997, toutes les têtes de lecture de disques durs utilisent la GMR, ce qui permet de détecter avec une grande sensibilité les petits champs magnétiques générés par les inscriptions sur un disque dur ou une bande, et ainsi d'augmenter considérablement la densité d'information stockée (130 gigabits/pouce² en 2004). Les capteurs GMR ont également été adaptés, dans l'industrie automobile ou aéronautique, à la détection de la position, de la vitesse ou du comptage d'objets magnétiques.

Mémoires magnétiques et nouvelles architectures de spintronique

Dans les nouvelles mémoires magnétiques MRAM (*Magnetic Random Access Memory*), les chercheurs ont utilisé l'effet TMR (*Tunnel Magneto Resistance*). Comme pour la GMR, la résistance de la jonction tunnel dépend de l'orientation des aimantations des électrons des deux couches magnétiques qui la composent. L'information binaire peut ainsi être codée dans une jonction tunnel. Contrairement aux classiques mémoires RAM dans lesquelles toute information s'efface dès l'arrêt de l'alimentation électrique, les mémoires MRAM ont la capacité de conserver les données qu'elles contiennent sans consommation d'énergie et avec un excellent potentiel de vitesse et de miniaturisation. L'industrialisation de ces mémoires est menée en France par ST Microelectronics et Altis, avec lesquels le CNRS collabore étroitement pour s'adapter aux besoins industriels et être en pointe au niveau mondial pour la conception des prochaines générations de MRAM : nouveaux matériaux (oxydes, semi-conducteurs) pour les jonctions, dynamique subnanoseconde de l'aimantation, nouvelles architectures de cellules mémoire pour les très hautes densités.

Nouveaux phénomènes de spintronique

Les effets de spintronique, GMR ou TMR, servent aujourd'hui à transformer l'information magnétique d'un disque ou d'une cellule de MRAM en signal électrique. Un tournant décisif a été pris récemment avec le nouveau concept de transfert de spin qui, en sens inverse, permet d'écrire une information magnétique en transférant des spins transportés par un courant électrique. Ce concept devrait permettre un encodage purement électronique de cellules magnétiques de plus en plus petites dans les prochaines générations de mémoires. Une autre voie possible d'utilisation se situe dans des circuits logiques, avec la possibilité unique de pouvoir reconfigurer le circuit par la commutation de l'aimantation d'éléments magnétiques. L'évolution va en effet vers la fusion entre spintronique et électronique classique, d'où la nécessité de réaliser des hétérostructures semi-conducteurs/matériaux magnétiques.

Spintronique

Les études prometteuses menées sur le problème de l'injection ou de la manipulation d'électrons polarisés en spin dans un semi-conducteur et sur la recherche de matériaux hybrides plus performants présagent de l'émergence de nouvelles fonctionnalités pour les technologies de l'information et, à plus long terme, pour le calcul quantique...

Matériaux du futur pour la spintronique

Les dispositifs spintroniques actuels utilisent des alliages de cobalt et de fer pour polariser les spins. La polarisation obtenue est modeste, elle est par exemple inférieure à 50 % dans les jonctions des mémoires MRAM. La découverte de conducteurs de polarisation proche de 100 % permettrait d'améliorer sensiblement les performances de ces dispositifs. Un oxyde de manganèse a révélé une polarisation quasi-complète et des jonctions utilisant cet oxyde atteignent des magnétorésistances record de 2000 %. Ces performances obtenues à basse température sont cependant trop dégradées à température ambiante pour envisager des applications. Une piste est toutefois ouverte et d'autres oxydes prometteurs sont aujourd'hui étudiés. Un nouveau concept, celui du filtrage en spin par effet tunnel à travers un isolant magnétique, devrait aussi conduire à de très hautes performances.

Semiconducteurs magnétiques

L'information est actuellement enregistrée et traitée grâce à deux types de matériaux très différents : ferromagnétiques et semiconducteurs. Dans les mémoires de masse, l'information est enregistrée dans des métaux ferromagnétiques, qui possèdent la propriété de s'aimanter lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique et de conserver une partie de cette aimantation lorsque le champ est supprimé. Le traitement de l'information utilise des composants issus de la microélectronique et de l'optoélectronique à base de semiconducteurs. Ils sont capables de contrôler le transport de courant et l'émission de lumière. L'électronique de spin cherche à intégrer ces deux fonctions. L'intégration ultime consisterait à rendre le semiconducteur lui-même ferromagnétique et à l'associer au semiconducteur normal dans des nanostructures. De tels semiconducteurs ferromagnétiques (à basse température) existent : les laboratoires du CNRS les réalisent, cherchent à améliorer leurs performances et étudient les possibilités nouvelles qu'ils créent. On sait d'ores et déjà moduler leur aimantation par une tension électrique (et non un courant, consommateur d'énergie) ou en les illuminant, ce qui permettrait d'enregistrer une image directement.

Émission d'électrons polarisés

Un des enjeux de la spintronique est d'utiliser des courants fortement polarisés en spin dans les matériaux conducteurs. On dispose actuellement de faisceaux d'électrons libres polarisés à près de 100 % dans le vide. Pour obtenir ces faisceaux, les chercheurs illuminent à température ordinaire un matériau semiconducteur avec une lumière polarisée circulairement. Les photons sont alors absorbés et provoquent l'excitation des électrons en leur transférant leurs caractéristiques de rotation. C'est le pompage optique. Ce phénomène produit un gaz d'électrons libres polarisés en spin. Même si l'on ne prévoit pas d'application grand public à court terme de ces techniques de pompage optique, elles sont néanmoins très utiles dans différents domaines de recherche fondamentale, en particulier pour l'étude de l'injection d'électrons polarisés en spin dans les dispositifs de spintronique.



Fabrication par lithographie optique de jonctions tunnel magnétiques.

© CNRS Photothèque / Thales - H. Raguet.

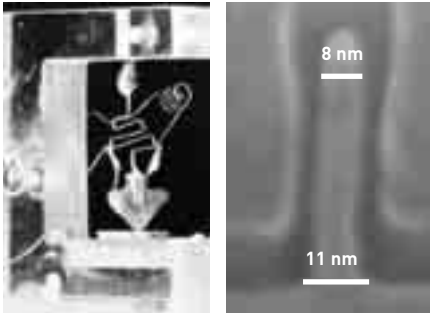


Source d'électrons polarisés (plaque dorée supérieure) dans une enceinte à ultraviolette et dispositif de collecte et d'analyse des électrons émis (au centre).

© PMC/CNRS - Ecole polytechnique.

Nanoélectronique

L'avenir de l'électronique est conditionné par notre capacité à réduire la dimension des composants électroniques élémentaires. Désormais, les dimensions critiques de ces composants comme les transistors ne sont plus évaluées en microns mais en dizaine de nanomètres. Deux approches complémentaires sont engagées au CNRS : l'adaptation des technologies existantes à l'échelle nanométrique et la construction de composants à partir de nanostructures, de molécules ou même d'atomes.



À gauche : premier transistor à pointe (1947).
À droite : transistor en technologie CMOS.

Nanoélectronique en technologie silicium

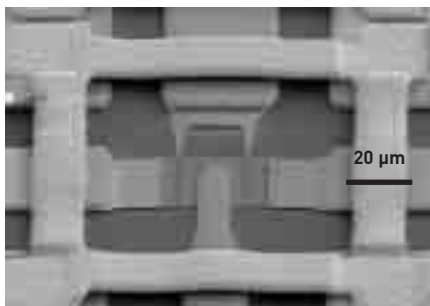
La microélectronique silicium est gouvernée par la miniaturisation forcée des dimensions caractéristiques des composants CMOS, filière essentielle de l'industrie des circuits intégrés. Cette réduction prévue des dimensions, connue sous l'appellation de loi de Moore, conduira à la fabrication de transistors n'excédant pas une dizaine de nanomètres dans les années 2010. Le développement de la filière CMOS sur silicium se heurte à des phénomènes quantiques incontournables qui nécessitent le développement de nouvelles architectures. Les techniques de miniaturisation qui utilisent l'approche *top down* deviennent également difficiles à maîtriser. C'est pourquoi il faut envisager le remplacement des composants CMOS soit par des dispositifs non planaires sur substrats massifs (SOI) soit par des composants issus de la nanoélectronique. Des innovations technologiques audacieuses impliquant l'introduction de nouveaux matériaux sont étudiées au CNRS (substrats SOI, alliages SiGe contraints, grille métal/high K), afin de proposer des solutions originales en termes de matériaux, de procédés technologiques ou d'architectures des dispositifs qui permettront de repousser ces limites d'intégration.



Transistor à base d'un nanotube de carbone auto-assemblé et connecté électriquement pendant sa synthèse.

Nanocomposants à nanotubes de carbone

Le CNRS exploite les propriétés exceptionnelles des nanotubes de carbone pour imaginer des composants électroniques nanométriques. Une de ces propriétés est la capacité des électrons à se propager à l'intérieur d'un nanotube de carbone sans résistance électrique jusqu'à la jonction avec le métal, où une résistance apparaît. En appliquant un champ électrostatique sur une électrode au voisinage de ces contacts, il est possible, dans le cas d'un nanotube semiconducteur, de moduler cette résistance. Ces jonctions deviennent alors des transistors à effet de champ ultraminiaturisés. En fonctionnalisant par voie chimique ces surfaces de contact, on peut aussi réaliser des capteurs d'une sensibilité inégalée. Autre propriété particulièrement intéressante : les nanotubes de carbone sont des sources d'électrons très performantes. Ils ouvrent des perspectives nouvelles aux dispositifs à émission de champ comme, par exemple, la réalisation d'écrans plats.



Circuit intégré coplanaire sur une hétérostructure III-V (ici phosphore d'indium).

Nanoélectronique III-V

La diminution des dimensions des circuits électriques et les excellentes propriétés de transport électronique des hétérostructures III-V, composées de deux éléments appartenant aux colonnes IIIb et Vb de la classification périodique des éléments, permettent d'envisager la conception et la fabrication de dispositifs fonctionnant dans le domaine « térahertz/picoseconde ». La croissance de ces hétérostructures est parfaitement maîtrisée. Dès la fin des années 70, il a été démontré que l'utilisation de ces matériaux permettait d'améliorer les performances (rapidité, puissance et consommation) des transistors à effet de champ ou des transistors bipolaires. Grâce aux procédés modernes de lithographie, il est possible de fabriquer des transistors à hétérostructures III-V dont la fréquence de travail approche le térahertz soit 1 000 gigahertz. Les nanocomposants III-V ont de nombreuses applications industrielles dans le domaine des communications à ultrahaut débit.

Nanoélectronique

L'électronique moléculaire fait l'objet d'un intérêt croissant. Elle offre la possibilité de construire à faible coût des circuits électroniques à haute densité et de proposer des fonctionnalités nouvelles, difficilement réalisables en technologie traditionnelle, à base de composants à semiconducteur. Une molécule peut jouer deux rôles dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. Elle peut en être un composant actif ou une « boîte à outils » pour la fabrication programmée de nano-objets et de nanocomposants.

La conduction électrique dans les jonctions métal-molécule-métal

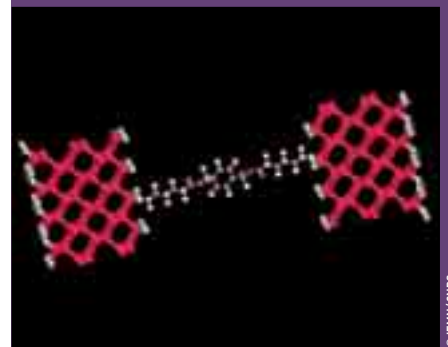
Connecter une molécule à deux fils métalliques est aujourd'hui possible grâce aux techniques de microscopie à effet tunnel ou de lithographie électronique. Ainsi les chercheurs peuvent mesurer la conduction électronique de la jonction métal-molécule-métal. À cette échelle, les phénomènes de conduction sont quantiques. Avant d'utiliser des molécules comme conducteurs électriques, il faut comprendre leur nature et le lien entre la structure de la molécule et les propriétés de transport. Des recherches menées en collaboration avec le CEA ont mis en exergue l'importance du lien chimique qui se crée entre la molécule et le métal. Ces expériences permettent d'imaginer des composants électroniques tirant parti de la richesse de la chimie et qui pourront intégrer des fonctions de calcul dans une seule molécule.

La conduction de l'ADN, mythe ou réalité ?

Dans la recherche de conducteurs nanométriques, les molécules d'ADN présentent un intérêt tout particulier. Elles peuvent être aisément manipulées, étalées sur une surface et offrent des propriétés d'auto-assemblage qui peuvent être exploitées pour la conception de nanocircuits auto-organisés. Cependant, les expériences réalisées sur la conduction électrique dans la molécule d'ADN ont abouti à des conclusions très contradictoires puisque certains annoncent que l'ADN est un conducteur et d'autres que c'est un semi-conducteur ou un isolant parfait. Un groupe de chercheurs CNRS a mesuré une résistance électrique de l'ADN de l'ordre de 100 kilo-ohms par molécule à température ambiante, ce qui correspond à la meilleure conduction observée à ce jour pour l'ADN. Ils ont montré que dans ces expériences, non seulement l'ADN est conducteur jusqu'à basse température, mais aussi que le transport est alors quantiquement cohérent sur une distance d'une centaine de nanomètres. Toutefois, le débat n'est pas clos, et le CNRS cherche désormais à caractériser et à maîtriser l'environnement et la structure des molécules étudiées, afin de comprendre les raisons de ces divergences.

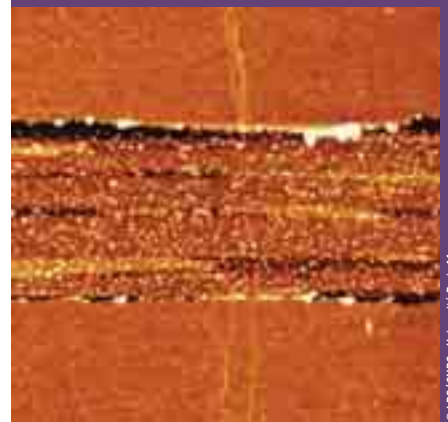
L'ADN, une boîte à outils pour les nanosciences

On sait depuis Watson et Crick que l'ADN est constitué de deux brins appariés en double hélice. Chaque brin est une séquence de molécules qui ne peut s'associer qu'à sa séquence complémentaire. Cette reconnaissance moléculaire univoque est utilisée par plusieurs équipes du CNRS pour lier, associer et positionner des nano-objets de manière programmée. Ici l'ADN n'est pas utilisé pour ses propriétés électriques, qui sont fortement débattues, mais comme une aide à la construction de nano-objets (nanofabrication programmée) ou comme gabarit moléculaire. Les chercheurs sont capables, en couplant un nano-objet à une séquence d'ADN, d'accrocher précisément ce nano-objet sur la séquence complémentaire et ainsi de réaliser de nombreuses constructions à l'échelle nanométrique.



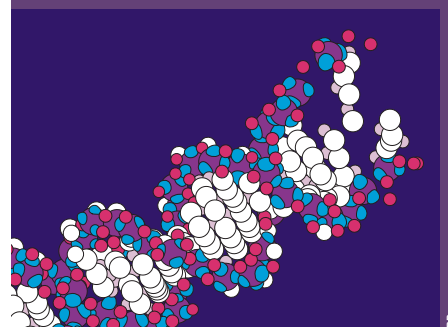
Exemple de jonction métal/molécule/métal.

© IEMN/CNRS.



Brins d'ADN étalés sur des contacts de platine séparés par une fente isolante.

© LPS/CNRS - Université Paris 11.

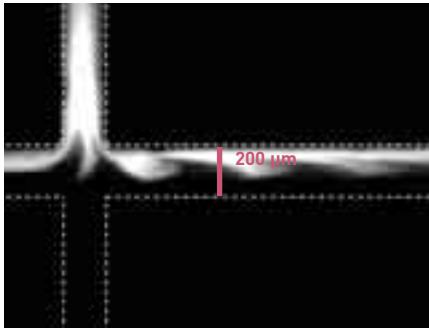


Structure d'une molécule d'ADN.

DR.

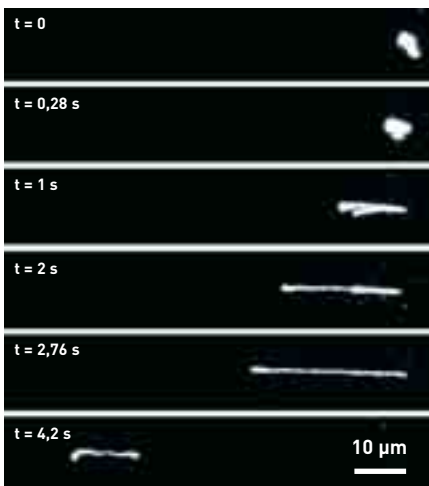
Intérêt des nanotechnologies pour la microfluidique

Aujourd'hui, les nouvelles technologies sont appelées à fabriquer des systèmes de taille micro- et nanométrique. Les nanosciences permettent de créer des systèmes miniaturisés multifonctionnels qui sont utilisés de manière spectaculaire dans de nombreux domaines comme la biologie, la chimie analytique et le génie chimique.



© PCT / CNRS - ESPCI, Paris.

Écoulement dans un mélangeur en croix.



© CNRS - Institut Curie / ESPCI

Changements de conformation d'une molécule d'ADN entrant en collision avec une nanocolonne de particules magnétiques au cours de sa séparation électrophorétique.

Les nanosciences pour la microfluidique

La microfluidique a été désignée par le MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) comme l'une des dix technologies susceptibles de révolutionner le 21^e siècle. On peut penser, en effet, que la maîtrise des flux de matière et de chaleur dans les microsystèmes rendra possible l'élaboration de systèmes de grande complexité, comparables à ceux produits par la nature et prêts à effectuer toutes sortes de tâches nouvelles afin, non seulement de réduire la consommation de produits chimiques, d'énergie et d'espace, mais aussi d'optimiser l'efficacité et de permettre la mobilité des expériences. C'est la problématique des laboratoires sur puce, appelés à engendrer une activité économique importante dans les prochaines années.

Deux filières sont développées au CNRS pour la réalisation des dispositifs microfluidiques. La première est le micro-usinage issu de l'industrie de la microélectronique, où les éléments microfluidiques sont gravés dans une plaquette de silicium ou une lame de verre. La seconde consiste à modeler, à partir de polymères ou d'élastomères, les éléments du dispositif. Ces techniques sont employées différemment suivant que l'on veut faire du prototypage rapide ou intégrer des nanostructures de haute densité. Enfin, il est souvent nécessaire de recouvrir les parois grâce à l'auto-organisation moléculaire. La frontière entre échelles nano- et micrométriques reste à l'évidence très poreuse pour la microfluidique.

Gels artificiels

Un des enjeux majeurs de la microfluidique est le développement de microsystèmes d'analyse pour la biologie et la médecine. Les nanotechnologies permettent de réaliser, au sein de dispositifs micrométriques, des structures nanoscopiques adaptées à l'échelle des molécules à analyser. Ainsi, deux équipes du CNRS, dont une associée à l'Institut Curie, ont développé des gels artificiels créés par auto-organisation réversible de nanoparticules magnétiques. On peut dans ces milieux séparer de grandes molécules d'ADN en quelques minutes, contre une douzaine d'heures par les méthodes traditionnelles. Les équipes tentent maintenant d'étendre cette approche au tri cellulaire.

D'autres types de gels artificiels basés sur des polymères auto-assemblés sont également développés et appliqués à la détection de mutations de prédisposition au cancer, en collaboration avec l'hôpital de l'Institut.

Nanotechnologies et microfluidique

Grâce à la microfluidique, les chercheurs peuvent intégrer sur une puce de verre, de silicium ou de plastique, des systèmes permettant d'analyser, de modifier ou de synthétiser des produits. C'est, vis-à-vis des fluides, l'équivalent des puces électroniques qui effectuent de nombreuses opérations sur des flux d'électrons.

Effet Fakir : nanotubes de carbone pour parois de microcanaux

La nature est une source d'inspiration constante pour la recherche de solutions technologiques innovantes. Ainsi, de nombreuses plantes ont développé des propriétés de surface remarquables, comme la super-hydrophobicité, qui s'oppose à l'étalement des gouttes d'eau sur leur surface. Ces propriétés étonnantes trouvent leur origine dans les micro- et nanostructures complexes que ces feuilles ont développées à leur surface : le liquide ne pénètre pas dans les anfractuosités et les forces de tension de surface maintiennent le liquide en suspension, comme sur un tapis de Fakir ! Fort de cette observation et de ses moyens technologiques, le CNRS, en collaboration avec l'Université Lyon 1, réalise des surfaces structurées à l'échelle du nanomètre et donc super-hydrophobes. Elles trouvent un champ d'application considérable en microfluidique, où l'un des enjeux majeurs réside dans la conception de solutions innovantes pour permettre le déplacement et la manipulation de petites quantités de liquide pour les besoins de l'analyse chimique et biologique. L'approche interdisciplinaire facilitée au CNRS, à l'interface entre nanotechnologies, microfluidique et physique des surfaces, a permis l'émergence d'une solution novatrice et originale pour réaliser à grande échelle des surfaces nanotexturées. Elle consiste à faire croître par voie catalytique directionnelle des tapis de nanotubes de carbone directement sur le support. Traitées chimiquement, ces surfaces deviennent super-hydrophobes et rendent possible le transfert et le déplacement des fluides dans les microcanaux.

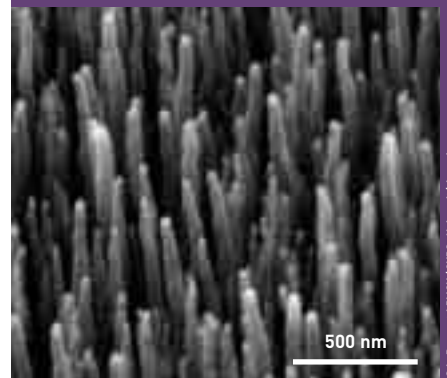
Microréacteurs et nanosciences : un essor réciproque et complémentaire

Les microréacteurs sont des cavités micrométriques qui abritent des réactions chimiques. Leur taille permet de réaliser et de contrôler un grand nombre de réactions chimiques simultanément sur une petite surface. Ce sont des éléments indispensables aux laboratoires sur puce. Les nanosciences ont apporté de nombreuses améliorations aux microréacteurs. Elles ont notamment permis de recouvrir l'intérieur de microcanaux avec des molécules catalytiques. Réciproquement, ces réacteurs chimiques sont devenus des outils de choix en nanosciences. Ils permettent le pilotage local de flux et le contrôle fin du mélange, qui sont les conditions indispensables à la synthèse de nouveaux nanomatériaux par précipitation, cristallisation ou chimie supramoléculaire. De nouveaux dispositifs, appelés réacteurs microstructurés, commencent à émerger. Il s'agit de macrosystèmes à microfluidique intégrée, destinés à la production industrielle. Le passage du laboratoire à la production génère de nouvelles recherches multi-échelles, nécessaires pour l'avenir industriel de ces nanotechnologies.



© L. Bocquet LPMCN/CNRS-Université Lyon 1.

Goutte d'eau déposée sur une surface super-hydrophobe. Elle ne s'étale pas et conserve donc sa forme sphérique. La surface est constituée d'un tapis de nanotubes de carbone.



© L. Bocquet LPMCN/CNRS-Université Lyon 1.

Image de tapis de nanotubes réalisée au microscope à faisceau d'électrons.



© GPM-LSG Nancy/CNRS.

Plaque avec des microcanaux de différentes géométries permettant l'étude de la séparation de phases gaz et liquide lors de l'ébullition confinée d'un liquide.

Contexte et problématique

L'engagement massif des chimistes du CNRS dans le développement de nouvelles méthodes de synthèse de matériaux ou d'objets structurés à l'échelle du nanomètre entraîne une véritable révolution de leur façon de penser et de travailler.

En généralisant les méthodes de la chimie supramoléculaire, premier domaine de la chimie ayant atteint l'échelle nanométrique, les chercheurs élaborent de nouveaux matériaux en agissant directement sur leurs structures les plus intimes. Ils savaient synthétiser des molécules uniques et nanométriques ou élaborer des matériaux organiques à l'échelle macroscopique, ils sont désormais capables de construire des matériaux molécule par molécule et même atome par atome. Au cours de ces nanosynthèses, un contrôle précis de la structure des produits est possible. Cette maîtrise permet l'obtention d'objets à « zéro défaut » ou même à « défauts contrôlés », dans le cas où la présence de défauts est à l'origine des propriétés recherchées. Certaines structures à trois dimensions : sphères, tubes, volumes géométriques complexes... jusqu'alors impossibles à construire de manière reproductible et à large échelle sont désormais élaborées au CNRS. De tels nanovolumes sont déjà utilisés comme dépolluants pour milieux complexes, comme transporteurs de médicaments vers une cible précise ou même comme microréacteurs qui autorisent la préparation de produits par voie propre, non polluante et très peu énergivore.

Les nouvelles méthodes de synthèse, comme les procédés métallurgiques ou l'auto-organisation, permettent d'assembler et d'organiser un grand nombre de nanostructures et d'obtenir ainsi des nanomatériaux aux propriétés macroscopiques étonnantes. Leurs structurations à l'échelle nanométrique entraînent l'apparition de propriétés nouvelles expliquées grâce aux développements de méthodes de modélisation et de simulation de plus en plus performantes.

L'élaboration de nanomatériaux et de nano-objets est donc à l'évidence un champ d'exploration nouveau pour la science et un facteur de progrès pour l'humanité, dans une vision optimiste de l'avenir de l'homme guidée par le développement durable.

Synthèse de nano-objets

Certains nano-objets ont des propriétés exceptionnelles qui permettent aux chercheurs d'inventer les matériaux de demain. Cependant, leur production reste encore faible en volume. Le CNRS investit dans le développement de méthodes de synthèse massives et efficaces de ces constituants clés pour les nanomatériaux.

Synthèse de nanotubes de carbone

La faible masse des nanotubes de carbone, couplée à leur solidité, permet d'augmenter la résistance de matériaux sans pour autant les alourdir. Isolés, les nanotubes de carbone sont des molécules d'avenir pour la nanoélectronique. Encore faut-il en disposer en quantité et qualité suffisantes. Le CNRS explore plusieurs voies de synthèse de nanotubes qui rendent possible une production massive de nanotubes : par décharge d'arc entre deux électrodes de graphite, par évaporation de graphite sous irradiation laser et par réaction chimique d'une vapeur carbonée avec un catalyseur métallique. Cette dernière voie permet de mettre en contact précisément un nanotube semiconducteur avec des électrodes. Elle est donc particulièrement adaptée à la nanoélectronique et permet d'ores et déjà la réalisation d'écrans plats. Un autre procédé original de synthèse de molécules carbonées utilise l'énergie solaire concentrée. Des nanotubes de carbone sont obtenus à partir de la vaporisation de graphite mélangé à des métaux à haute température (plus de 3 000 °C). Cette technique permet aussi, à partir de graphite seul, d'obtenir des molécules carbonées fermées, dont certaines ont une forme de sphère : les fullerènes.

Les dendrimères : des nano-objets modulables

Un dendrimère est une molécule géante arborescente préparée grâce à la répétition d'une séquence de réactions permettant la construction de couches successives (appelées générations) autour d'un cœur. À partir d'un certain nombre de générations, le dendrimère prend généralement une forme sphérique hautement ramifiée portant, en périphérie, des fonctions chimiques diverses. Les stratégies de synthèse et notamment celles développées au CNRS permettent le greffage de très nombreux groupements fonctionnels. Cette préparation « à façon » fait appel à une chimie propre sans rejet de produits toxiques. Elle permet un grand nombre d'innovations dans les domaines de la biologie, de la médecine et de la catalyse. Elle rend possible, en particulier, l'élaboration de nouveaux nanomatériaux et la modification de surfaces. Grâce au soutien du CNRS, certaines équipes françaises font figures de pionnières et sont à la pointe de ce domaine.

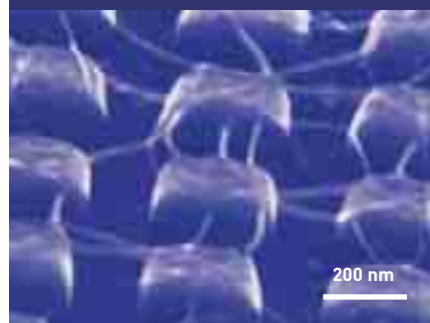
Synthèse par voie colloïdale

Une équipe du CNRS a mis au point une voie de synthèse physico-chimique simple de nano-objets. Dans une solution non polaire comme l'huile, certaines molécules dites tensioactives ont la capacité de former des gouttelettes ou des cylindres interconnectés de quelques nanomètres. Ces gouttelettes, ou colloïdes, protègent les macromolécules (enzymes, protéines...) qu'elles contiennent du solvant susceptible de provoquer leur dénaturation. Soumises au mouvement brownien, elles se déplacent de façon aléatoire dans la solution. Lors d'une collision entre deux colloïdes, leur contenu se mélange et un nano-objet se forme. Ils sont donc utilisés comme des nanoréacteurs capables de contrôler la taille et la forme des nano-objets synthétisés en leur sein. Une large variété de matériaux organiques ou inorganiques de formes différentes peut ainsi être synthétisée (nanotubes, nanodisques d'argent...).



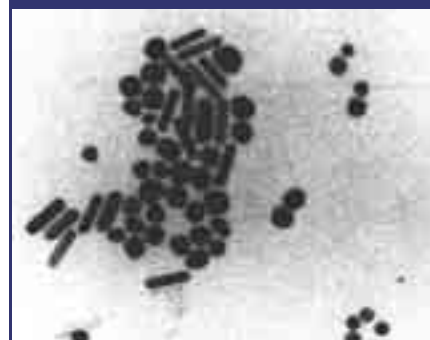
Réacteur de synthèse de nanotubes de carbone au grand four solaire d'Odeillo, pendant une expérience (vue de la cabine foyer).

© D. Luxembourg - CNRS photothèque.



Nanotubes de carbone auto-assemblés par croissance autour de tours de silicium.

© LEPES - CRTBT / CNRS.



Cylindres interconnectés.

© M.-P. Piloni LM2N/CNRS-Université Paris 6.

Élaboration de matériaux nanostructurés

Les nouveaux outils des nanosciences rendent la composition et la structure intimes des matériaux accessibles aux chercheurs, qui peuvent désormais structurer la matière à l'échelle du nanomètre.



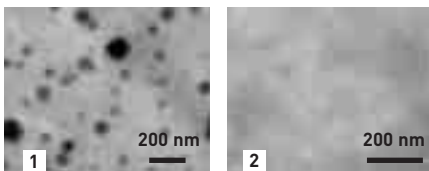
© C. Langlois, Y. Champion CECM/CNRS.

Grains de cuivre nanostructurés mesurant environ 100 nanomètres observés en microscopie électronique à transmission.



© CRPP/CNRS Bordeaux - TRI Princeton.

Fil de nanotubes.



© IMP/INSA Lyon - CNRS Université Lyon 1.

1 EVA/Si(OR)_x hydrolysé sans réticulation ;
2 matériau hybride organique-inorganique.
Clichés en microscopie électronique à transmission (4 % en masse de silice après hydrolyse complète du précurseur).

Nanométaux, l'exemple du cuivre nanocristallin

Le cuivre nanocristallin est utilisé en microélectronique mais il est aussi une référence pour l'étude des nanométaux. Il est élaboré par assemblage de nanoparticules de cuivre synthétisées grâce à la technique de condensation de vapeur. Sa fabrication nécessite des étapes de compaction, de traitement thermique et de densification sous pression développées grâce à la mise en commun d'expertises scientifiques et techniques relevant des domaines de la chimie, de la physique et du procédé. Ce nanomatériau révèle un comportement mécanique étonnant : il présente non seulement une dureté trois fois plus élevée que le cuivre classique mais aussi une grande aptitude à la déformation plastique. L'élaboration de matériaux à partir de particules nanométriques permet d'ores et déjà d'ouvrir de nouvelles perspectives d'applications très intéressantes pour la mise en forme de matériaux à température ambiante.

Fils de nanotubes de carbone

Le CNRS développe diverses méthodes d'élaboration de nanotubes. Ces méthodes permettent de synthétiser des nanotubes isolés. Cependant, leur exploitation sous forme de matériaux uniquement composés de nanotubes reste un verrou technologique pour les applications les plus innovantes : matériaux ultrarésistants, capteurs, actionneurs électromécaniques. Le CNRS développe différents axes de recherche pour relever ce défi. Parmi ces études : un procédé permettant de fabriquer des fils continus de nanotubes alignés et donc idéalement organisés pour tirer parti de leurs propriétés électriques et mécaniques. Ces fils présentent des ténacités supérieures aux fibres hautes performances existantes. Ils peuvent aussi être utilisés comme microélectrodes pour des biocapteurs ou encore comme actionneurs électromécaniques aux propriétés très prometteuses pour la robotique et la médecine.

Polymères nanostructurés

Les chercheurs d'un laboratoire CNRS-Université Lyon 1 ont développé une nouvelle voie de synthèse de matériaux hybrides organiques-inorganiques, non polluante car ne nécessitant pas de solvant. Ainsi il est possible de générer, dans un réseau de polymères, une phase inorganique constituée de domaines de silice de 5 nm de diamètre, au lieu de la centaine de nanomètres classique. L'élaboration de ces matériaux ne se limite pas à des films minces, il est aussi possible d'obtenir des objets massifs. Cette nouvelle technique peut également être utilisée pour la synthèse de particules isolées de quelques dizaines de nanomètres de diamètre. Ces matériaux nanostructurés ouvrent d'innombrables potentialités. On peut imaginer des traitements qui permettront d'obtenir des matériaux transparents et ignifugés ou conducteurs dont il sera toujours possible de choisir la consistance (souplesse, rigidité...).

Élaboration de matériaux nanostructurés

Dans des conditions adaptées, certains nano-objets peuvent se structurer spontanément pour former des réseaux de grande taille: c'est l'auto-organisation. Cette voie est particulièrement prometteuse pour réaliser des matériaux macroscopiques à partir de nano-objets élémentaires. La compréhension des mécanismes d'auto-organisation et leur maîtrise sont donc des enjeux essentiels pour les nanosciences.

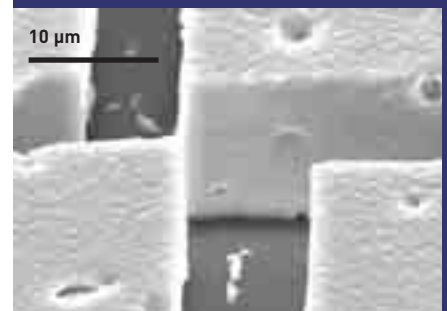
Auto-organisation de nanocristaux inorganiques

Les nanocristaux sont des cristaux dont la taille de grains est de l'ordre du nanomètre. Cette petite taille confère aux nanocristaux une surface de contact très importante avec leur milieu. Les propriétés singulières qui en découlent, en particulier leur grande réactivité chimique, présentent un intérêt aussi bien fondamental que pratique. Ces nanocristaux peuvent, soumis à diverses conditions, s'auto-organiser. De tels assemblages conduisent à des solides artificiels (des supracristaux) dont les propriétés physiques ne sont ni celles des objets isolés, ni celles du même matériau à l'état massif. Chaque nanocristal influence ses voisins et l'ensemble possède des caractéristiques que l'on dit collectives. Cette organisation influence leurs propriétés de transport électronique. Ils peuvent vibrer en cohérence et les interactions dipolaires qui s'établissent entre les particules induisent l'apparition de propriétés optiques et magnétiques spécifiques. Ces supracristaux peuvent coalescer à basse température, permettant ainsi la formation de monocristaux de grande taille. Ce résultat ouvre une nouvelle voie dans le domaine de la croissance cristalline. De plus, les motifs de nanocristaux organisés tels que des anneaux et des lignes peuvent être transférés sur un support de silicium et résistent à la gravure. Ils peuvent donc être utilisés pour la nanolithographie.

Auto-organisation sur des surfaces cristallines

Dans la course à une densité de stockage de l'information toujours plus grande, une approche révolutionnaire consisterait à enregistrer un bit magnétique sur une nanostructure magnétique. Pour cela, il faut pouvoir disposer de réseaux de nanostructures régulièrement réparties.

L'auto-organisation de nanostructures sur des matériaux naturellement pré-structurés est une technique de nanofabrication simple et économique. Au lieu de graver des couches minces par des techniques de lithographie, des atomes individuels sont déposés sur un matériau présentant des sites de fixation privilégiés et périodiquement distribués. Un réseau de nanoplots avec une surprenante régularité de taille et d'espacement est ainsi réalisé en une seule étape. Une équipe CNRS a obtenu, par exemple, un système d'atomes de cobalt déposés sur une surface d'or reconstruite qui montre une assemblée de nanoparticules magnétiques de quelques nanomètres de diamètre (hauteur 0,4 nm), à haute densité (26 térabits/pouce²), sans interaction et présentant une étroite distribution d'énergie magnétique. Cette approche de type *bottom up* massivement parallèle ouvre la voie à de nouvelles investigations des propriétés physiques des structures à l'échelle du nanomètre.



Supracristaux de nanocristaux d'argent de 5 nm de diamètre, organisés sur longue distance en réseau de type cubique face centrée.

© M.-P. Pileni LM2N/CNRS - Université Paris 6.

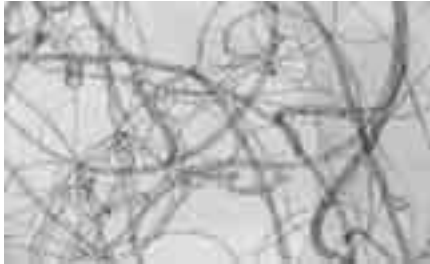


Croissance auto-organisée de cobalt (en blanc) sur une surface d'or au microscope à effet tunnel.

© MPO/CNRS - Université Paris 7.

Propriétés mécaniques de matériaux nanostructurés

Les dimensions nanométriques des composants d'un matériau induisent l'apparition de propriétés nouvelles tout en répondant aux lois de la chimie classique. C'est une porte ouverte sur la découverte de propriétés encore inexplorées.



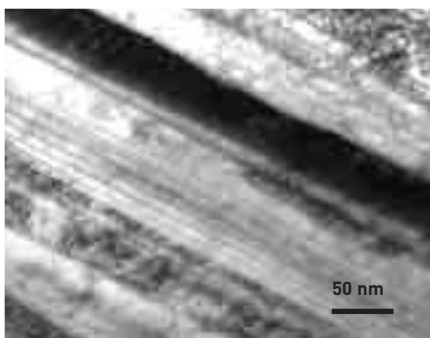
© GEMPPM/CNRS-Insa Lyon.

Nanotubes de carbone vus par microscope électronique à transmission.



© J. Bai, F. Garnier MSSMAT/CNRS.

Nanotubes de carbone greffés sur des renforts micrométriques.



© MSSMAT/CNRS-ECP.

Vue au microscope électronique à transmission de la microstructure d'un acier fortement tréfilé.

Nanomatériaux et nanorenforts particuliers pour les composites

Les composites à base de polymères sont généralement renforcés par des fibres de diamètre de l'ordre de 10 µm. En utilisant certains renforts de taille nanométrique, on obtient des composites multifonctionnels aux propriétés mécaniques, électriques, optiques (transparence) ou de surface originales. Les renforts utilisés peuvent être sphériques (silice, noir de carbone), plaquettaires (argiles), fibreux (nanofibrilles de cellulose, nanotubes de carbone). Dans ces matériaux, les distances typiques entre renforts sont comparables aux dimensions des macromolécules de la matrice, ce qui leur confère des propriétés remarquables de module mécanique : ils deviennent plus rigides. Dans certains cas, ils atteignent une ténacité notablement plus élevée que celle des matériaux classiques.

Nanotubes de carbone pour renforts de matrices polymères

Les nanotubes de carbone sont 100 fois plus résistants que l'acier en traction et ce sont de bons conducteurs électriques et thermiques. Ces propriétés extraordinaires ont fait germer l'idée de renforcer les matériaux à base de polymères afin de moduler leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques ou thermiques. Actuellement, la production sélective des nanotubes et leur intégration à des composites sont des problématiques autour desquelles le CNRS se mobilise. Tout en portant une attention particulière à la sécurité lors de leur manipulation, les chercheurs tentent de combiner des renforts de dimensions multiples. Les effets de renforcement qui en résultent sont issus de l'association de phénomènes à différentes échelles. Une importante contribution du CNRS pour l'amélioration de la sécurité et de la performance des composites consiste à greffer des nanotubes de carbone sur les renforts micrométriques. L'ensemble devient beaucoup moins volatile et plus aisément utilisable pour le renforcement de polymères.

Fils d'aciers très fortement tréfilés

Les fils d'aciers très fortement tréfilés (qui ont été étirés grâce à un passage par une filière) peuvent atteindre des résistances mécaniques exceptionnelles (proches de 5 000 MPa), supérieures à celle des fibres de carbone. Ils peuvent être utilisés aussi bien pour la fabrication de câbles que pour la synthèse de matériaux composites. Comprendre l'origine de ces propriétés mécaniques est un enjeu important même s'il est reconnu que la nanostructuration du matériau lors du tréfilage est une des raisons principales de l'apparition de ces propriétés. Une partie des recherches menées par le CNRS est centrée sur l'étude des mécanismes de plasticité de ces fibres. Grâce à l'utilisation de différentes techniques physiques (microscopie électronique à transmission ou à balayage), d'essais mécaniques et de modèles numériques, les chercheurs décrivent la microstructure de ces fibres aux échelles nano- et micrométriques afin de mieux comprendre l'origine de leur très grande résistance.

Modélisation et simulation

La compréhension des phénomènes observés expérimentalement repose sur leur modélisation théorique. Les nanosciences, qui n'échappent pas à cette règle, mobilisent un continuum de méthodes numériques et théoriques qui doivent à la fois décrire, dans un cadre quantique, des nano-objets ou des molécules, mais aussi rendre compte de leurs comportements macroscopiques. En s'appuyant à la fois sur les nouvelles avancées en physique-chimie théorique et sur l'accroissement exponentiel de la puissance des ordinateurs, les laboratoires du CNRS s'impliquent fortement dans le développement de ces méthodes.

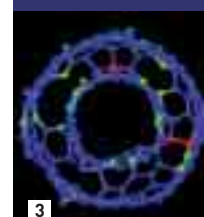
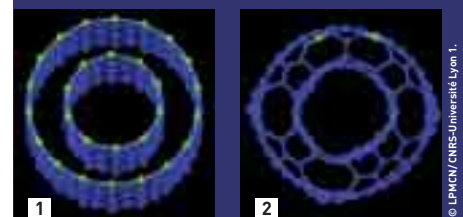
Simulation de la structure et de la croissance de nanoparticules

Les tailles caractéristiques des nano-objets rendent possible la simulation directe des mouvements individuels des atomes qui les composent. La formation, la structure et la composition de nano-objets existants ou supposés ont pu être ainsi prédites grâce à la modélisation. Avant même qu'il ne soit mesuré, l'effet de taille sur les propriétés mécaniques et thermiques des nanostructures peut être calculé et les mécanismes microscopiques prépondérants identifiés. En thermique, ces travaux ont déjà été utilisés, notamment au CNRS, pour augmenter la densité des mémoires, pour améliorer le pouvoir de conversion thermoélectrique lors du refroidissement des microprocesseurs ou encore pour élaborer les matériaux les plus isolants qui soient.

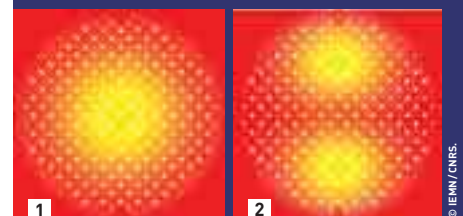
Un autre exemple important de l'intérêt des simulations numériques est celui de la compréhension des mécanismes de croissance de nanoparticules, nanofils ou nanotubes. Leur morphologie (taille, symétrie...) conditionnant de façon radicale leurs propriétés, il est crucial de comprendre quels facteurs (température, catalyseurs...) influencent la croissance des nano-objets et favorisent l'adoption d'une forme spécifique. Expérimentalement, il est souvent impossible d'observer *in situ* les mécanismes dynamiques à l'œuvre durant leur formation. En simulant la croissance de nanoparticules à l'aide d'un ordinateur, on peut visualiser ces mécanismes à l'échelle de l'atome et comprendre les raisons de la formation de matériaux aux propriétés spécifiques. Ces informations sont par ailleurs précieuses pour inventer de nouvelles stratégies de synthèse.

Calcul des propriétés électroniques des nano-objets et nanomatériaux

Les simulations numériques sont aussi essentielles à la recherche de nouvelles applications aux propriétés physiques (électroniques, optiques, mécaniques ou chimiques) des nano-objets. Leur taille nanométrique rend possible la résolution des équations de base de la mécanique quantique et donc la simulation directe des électrons du système. Ces équations peuvent être résolues soit par des méthodes *ab initio* qui s'appuient sur les principes élémentaires de la physique et ne comportent aucun paramètre ajustable, soit par des méthodes semi-empiriques basées sur des modèles physiques simplifiés et comportant donc quelques paramètres ajustables. Ces outils permettent d'étudier la réponse des nanomatériaux à des excitations extérieures (champ électrique, optique). Leur intégration dans des simulateurs de dispositifs complexes vise à simuler un système entier directement à partir de sa description à l'échelle atomique.



Mécanisme de croissance *in vitro* de nanotubes bicouches.



Fonction d'onde d'un électron dans un nanocristal d'arseniure d'indium.
1. État fondamental.
2. État excité.



Modélisation de boîtes quantiques de nitrure de gallium (GaN).

Contexte et problématique

Après les grandes controverses qui ont ébranlé nos sociétés depuis vingt ans, comme celle sur les organismes génétiquement modifiés, les nanosciences sont en train d'envahir la scène publique au travers de nouveaux débats de grande ampleur. La mondialisation des échanges, la prolifération de nouvelles fictions littéraires, les alliances entre science, industrie et défense, et les mouvements sociaux porteurs d'aspirations humanistes, constituent ensemble le terreau approprié pour l'éclosion de grands débats portant sur les visions probables et souhaitables du monde futur. Les institutions de recherche, les entreprises et les États risquent d'être pris à parti dans ces immenses controverses.

Les travaux de recherche en nanosciences aboutiront à l'émergence de technologies dotées de capacités d'apprentissage, de communication, de stockage d'informations ainsi que d'une plus grande autonomie énergétique. Les sociétés devront bientôt composer avec ces nouveaux objets du point de vue du droit, de l'éthique et de la politique. Ces innovations technologiques, sources de progrès, seront aussi sources d'appréhension. Comment gérer les controverses naissantes ? Leur entrée dans notre vie quotidienne conduira à transformer des pans importants de la vie en société, à imaginer les usages et les nouveaux réseaux sociotechniques à construire. Quelles transformations législatives, professionnelles et économiques sont nécessaires pour être en mesure de tirer profit de ces nanoressources ?

Source de craintes pour les uns, d'espoirs pour les autres, parfois mêlés, ce domaine nouveau, dans lequel les chercheurs du CNRS sont fortement partie prenante aux côtés de l'industrie, nécessite une réflexion éthique élaborée au sein même du CNRS et dans la plus grande liberté. Le Comité d'éthique des sciences du CNRS (Comets) a engagé en 2004 une réflexion sur l'éthique et les nanosciences. En auditionnant les personnalités engagées dans les recherches en nanosciences ou dans la réflexion éthique sur elles, le Comets se forge sa propre vision éthique du domaine et sensibilise, par le dialogue et l'écoute, les personnels du CNRS mais aussi les membres du Comité national dans l'exercice de leur fonction d'évaluation.

Les nanosciences dans la société

Les sociologues, politologues, économistes du CNRS décryptent les nanosciences, leur organisation, leurs risques éventuels et leur perception par les différents acteurs sociaux.

Nanosciences et macrorisques ?

Doit-on avoir peur de tout ce qui est nano ? Quoique nous cohabitons sans le savoir avec des nano-objets depuis des millénaires, dans les encres, colorants et autres pigments, par exemple, l'apparition de nouvelles technologies suscite toujours des interrogations qui prennent parfois un aspect dramatique. C'est le cas avec les nanotechnologies, qui sont exploitées afin d'élaborer des scénarios catastrophe relatant la fin de la vie terrestre. Les questions philosophiques et éthiques qui se posent (respect de la vie privée et défense de l'environnement, entre autres) doivent être étudiées avec sérénité, sans alarmisme injustifié. Des risques variés sont toujours corrélés aux nouvelles technologies introduites par l'homme. Conscients de ces inquiétudes, les scientifiques des nanosciences ont déjà engagé des études permettant de quantifier certains de ces risques (toxicité, aspects cancérogènes et mutagènes, pollution environnementale...). Les sociologues et les politologues du CNRS ont d'ores et déjà développé une capacité d'expertise autour de la question des risques émergents et des grandes controverses. La recherche se penche sur les mécanismes de régulation convoqués par ces questions de société. Le CNRS participe à des structures nationales et internationales de réflexion (Comité national d'éthique...) dont le but est d'apporter des réponses claires et objectives à ces questions.

Un véritable bouleversement de notre mode de vie

Le rejet ou l'appréhension liés aux objets issus des nanosciences ne relèvent pas uniquement des risques ou de la nouveauté. De nouvelles questions très spécifiques se posent. Les nanosciences vont bientôt rendre possible la miniaturisation d'objets d'utilisation courante. Certains objets pourront même être invisibles à l'œil nu. Cette remise en cause de notre perception traditionnelle du monde ne peut que s'accompagner de questionnements. Comment optimiser l'interaction entre l'utilisateur et la machine ? Comment faire confiance à un objet qui va agir sur nous, et sur lequel nous n'avons pas de prise directe ? Autre question prégnante : des systèmes de surveillance nanométriques pourront améliorer la traçabilité de produits, mais ne seront-ils pas aussi une menace potentielle des libertés individuelles ? Pour toutes ces raisons, le CNRS s'attache à favoriser la réflexion et le débat en amont entre les différents acteurs sociaux, scientifiques, politiques et le grand public.

Dynamique de production de connaissances et d'innovation

Ce qui se passe en matière de nanotechnologies est exemplaire d'un double phénomène de concentration territoriale et de mise en réseau des compétences scientifiques et technologiques. C'est un phénomène majeur dans l'histoire des sciences et des techniques : après l'ère des grands équipements et des grands programmes technologiques, puis la montée en puissance des réseaux de coopération scientifique, survient l'ère des districts scientifiques et techniques. Les chercheurs du CNRS, sociologues, économistes, politologues, mais aussi gestionnaires et géographes, s'attachent à comprendre ce phénomène de territorialisation des sciences et les dynamiques économiques correspondantes.



© CNRS Photothèque.



© CNRS Photothèque.



Les nanosciences et le continuum formation-recherche-innovation-transfert industriel

2005, année mondiale de la physique, est l'occasion de montrer aux jeunes, professionnels de demain, l'intérêt des sciences. Fait important, l'université, les écoles, et les laboratoires surtout, s'engagent fortement dans la mise en place de formations adaptées à des jeunes scientifiques, futurs chercheurs, ingénieurs, techniciens et professeurs, et leur rendent accessible le sanctuaire de la salle blanche, qui fut longtemps réservé aux seuls professionnels de la microélectronique. Cet engagement est vital, dans ce domaine comme dans d'autres, pour le développement des emplois scientifiques, puisque l'offre en ressources humaines de haute qualification s'avère déterminant dans les choix d'installation des grandes entreprises sur le territoire national (Alliance Motorola, Philips, STMicroelectronics, Altis) ou parfois leur maintien dans le creuset géographique initial. Parallèlement, le renforcement du fonctionnement du réseau de recherche académique *C'Nano* doit s'amplifier, car *C'Nano* a vocation à devenir l'instrument intégrateur capable de fournir une réponse synthétique aux décideurs régionaux et industriels tout en conservant une coordination nationale.

L'explosion des nanosciences est-elle portée par le seul enthousiasme du chercheur, désormais pourvu d'une nouvelle friche à explorer? La réponse est non. La rencontre de San Francisco (1-3 juin 2005, *1st Int Nano. Conf.*) met en relief les convergences américaines, japonaises et européennes, exprimées à la fois par les porteurs de programmes académiques (NSF...) et les associations d'industriels de la microélectronique. Les investissements dans le domaine des nanos concernent deux tiers des compagnies américaines cotées en bourse, et plus de 600 jeunes pousses.

Sommes-nous encore dans une phase de recherche exploratoire avec son lot d'incertitudes? La réponse est nuancée. Oui pour la majeure partie. Mais avec des percées dans la microélectronique, comme l'électronique de spin. La découverte par Albert Fert (médaille d'or du CNRS en 2003), à la fin des années 80, de la magnétorésistance géante, matrice fertile de l'électronique de spin et de sa forme plus achevée et quantique, la TMR (*Tunnel Magneto-Resistance*), a permis 15 ans plus tard de produire quelques dizaines de milliards de têtes de lecture de disques durs par an.

Le continuum formation-recherche-innovation-transfert, apparent dans le champ des micro- et nano-électroniques, domaine en pointe pour accepter de rapides transferts technologiques dès lors qu'ils sont compatibles avec les technologies lourdes existantes, trouvera d'autres segments d'applications, plus longs à mettre en œuvre, mais moins dépendants du substrat technologique. La santé, notamment les domaines du diagnostic et de l'apport des médicaments, la sécurité avec des capteurs dispersés aussi bien dans l'automobile que dans les autres instruments de l'activité humaine, le transport, l'énergie nomade (distribution ou création) sont autant de champs où la demande présente un fort potentiel. Le nanodispositif, essentiellement passif de nos jours, actif demain, en empilement interactif après-demain, sera comme le transistor produit avec une approche massivement parallèle, fiable et donc bon marché. L'acceptabilité sociale des nanosciences sera dépen-

dante, bien sûr du substrat culturel, mais aussi de la force intrinsèque de l'innovation à l'exemple du téléphone portable, actuellement dans les mains de plus de 2 milliards d'hommes, de femmes... et d'adolescents.

Le CNRS est particulièrement attentif au développement de collaborations scientifiques avec des laboratoires européens de renommée internationale. Cet objectif se décline selon plusieurs pistes. Tout d'abord le soutien apporté par le CNRS à la formation d'un *Eranet* nanosciences : ce concept de réseau, créé par la Commission européenne pour promouvoir la coordination des programmes nationaux, a pour objectif de réussir, à travers une dizaine de pays européens, à réaliser des appels d'offres communs évalués ensuite par un comité européen d'experts. Le rôle du CNRS, au sein de l'action concertée « Nanosciences », a été déterminant pour la mise en place de cet instrument innovant au sein de la communauté scientifique européenne, difficile à mettre en œuvre si l'on regarde la diversité des textures de soutien aux nanosciences dans les pays concernés.

Plus immédiates sont les créations de Laboratoires européens associés (LEA) tel celui entre l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN, CNRS-Université Lille 1-Université de Valenciennes-ISEN) et l'Université catholique de Louvain (UCL). Ce laboratoire, le Laboratoire européen en microélectronique et microsystèmes (LEMM) a pour but de développer des travaux communs en microtechnologies et microsystèmes ainsi qu'en composants avancés et matériaux pour la nanoélectronique. Le nanomagnétisme est également porteur d'un autre LEA entre le Laboratoire Louis Néel (LLN, CNRS) à Grenoble et son homologue de la *Max-Planck Gesellschaft* à Halle.

À une échelle intermédiaire, les *CNano* mis en place en 2004 et 2005, outils d'optimisation et de coordination nécessaires aux laboratoires français, constituent également un vecteur de partenariat de premier choix pour les autres régions européennes aux avant-postes dans le domaine des nanosciences.

Selon toutes les estimations, en particulier celles d'outre-Atlantique, les enjeux économiques des nanosciences sont très larges et très divers. Les savoir-faire expérimentaux et théoriques, les technologies mises en jeu, les coordinations avec les entreprises et entre entreprises, jeunes pousses ou consortium de la microélectronique, déterminent l'échelle de la mutualisation de ces nouveaux segments de la connaissance. Pour faire fructifier le développement des connaissances dans le domaine des nanosciences, rapidement et sous des formes variées, le CNRS, avec d'autres organismes équivalents au sein de l'Europe scientifique, est déterminé à être moteur pour créer de nouvelles voies d'échanges et de nouveaux espaces de partage du savoir scientifique et technologique.



Quelques indicateurs

- Effort mondial* : 9 milliards de dollars par an.
- Budget des États-Unis : 3 milliards de dollars par an, dont 1 milliard de dollars fédéraux. 65 % du milliard de dollars fédéraux sont consacrés à la recherche académique (14 % pour le *National Institute of Health*, 31 % pour la *National Science Foundation*, 24 % pour le *Department of Defense*).
- Effort total des pays européens : environ 1 milliard d'euros par an, dont 700 millions d'euros de contributions nationales des pays européens et environ 300 millions d'euros annuels pour le 6^e PCRDT.
- Au total, le budget du 6^e PCRDT pour la priorité « nanosciences et nanotechnologies » s'élève à 1,3 milliard d'euros pour les 5 ans du programme.
- 166 laboratoires associés au CNRS travaillent dans le domaine des nanosciences, sur 190 laboratoires français identifiés par l'Eranet.
- Budget consolidé : 150 millions d'euros par an pour les laboratoires associés au CNRS.
- Personnel : 3 500 chercheurs, ingénieurs, techniciens, enseignants-chercheurs et doctorants actifs dans ces laboratoires, dont 1 000 chercheurs, ingénieurs et techniciens permanents du CNRS.
- Surface totale de salles blanches dans les grandes centrales : 6 000 m².

*selon le programme américain *National Nanotechnology Initiative*

Pour en savoir plus :

Adresse web nanosciences du ministère de la Recherche :

www.nanomicro.recherche.gouv.fr

Adresse web nanosciences du CNRS : www.spm.cnrs-dir.fr/nanosciences

Cette plaquette est éditée par la Délégation à l'information scientifique et technique (DIST) du CNRS.

Remerciements à tous les chercheurs qui ont contribué à la réalisation de ce document.

Responsable des publications institutionnelles : Stéphanie Lecocq (01 44 96 45 67)

Conception et coordination : Aude Philippe et Jean-Yves Marzin

Recherche iconographique : Aude Philippe

Conception graphique : Laura Slawig

Adaptation graphique et exécution : Sarah Landel

Conception couverture : Atalante-Paris

Impression : Caractère

Septembre 2005



FOCUS

SEPT.
2005

www.cnrs.fr



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
3, RUE MICHEL-ANGE 75794 PARIS CEDEX 16 • TÉL. 01 44 96 40 00 • TÉLÉCOPIE 01 44 96 53 90