

# Les Savanturiers

En mission avec les scientifiques du CEA

n°14

## Plongée dans le nanomonde

Les « nanos », vous connaissez ? Pour découvrir le monde à une si petite échelle, il a fallu mettre au point de nouveaux outils d'élaboration, de mesure et de caractérisation, à l'échelle des atomes. Cela a été possible dans les années 1980, lançant les recherches en nanosciences et nanotechnologies. En peu de temps, de nombreuses applications ont vu le jour et font déjà partie de notre quotidien.

Vue d'un échantillon dans un microscope à force atomique.

### Sommaire :

**Découvrir :** Une question d'échelle  
Pages 2-3

**Des outils** et des hommes  
Pages 4-5

**Des nanomatériaux** au quotidien  
Page 8



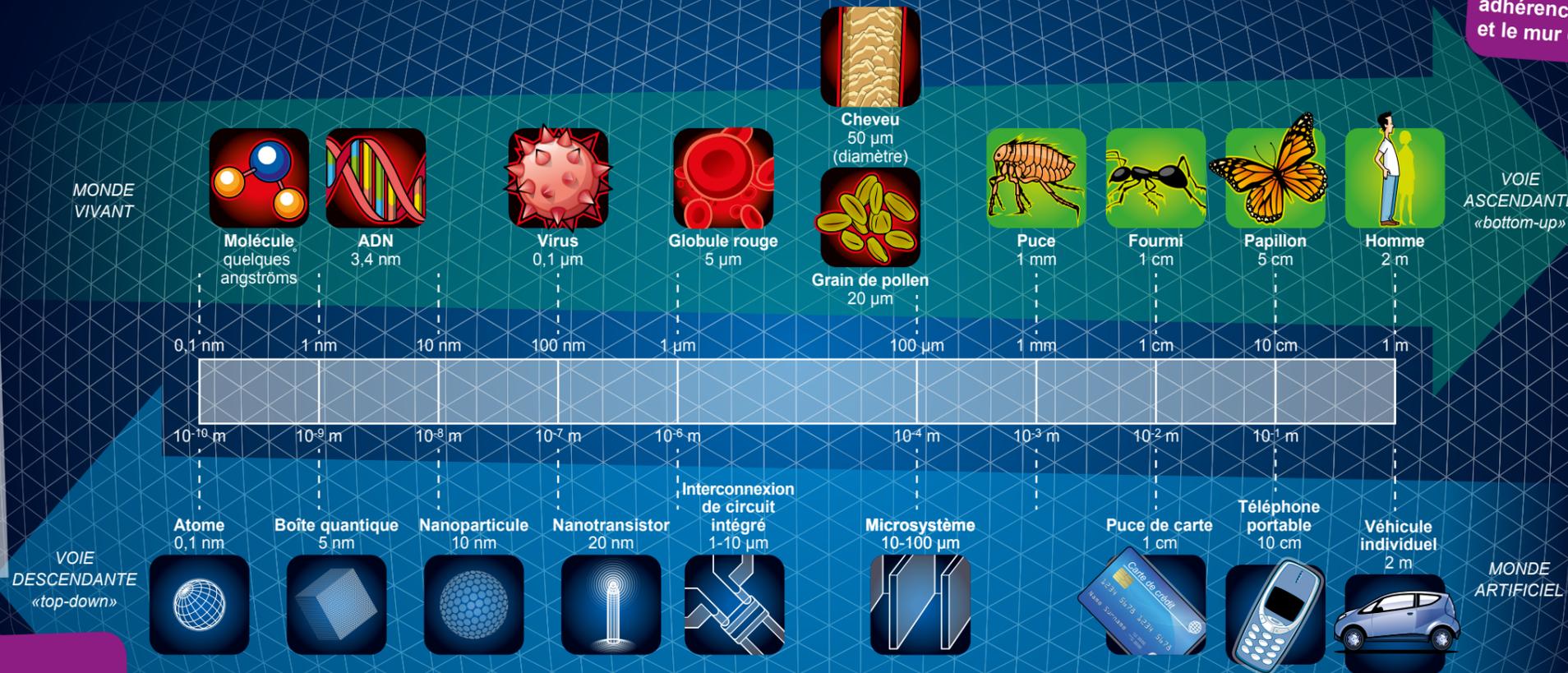
# Découvrir : Une question d'échelle

## Les 4 forces

Dans la Nature, il existe quatre interactions fondamentales. L'interaction nucléaire forte, telle une « glu » entre deux nucléons (proton ou neutron), assure la cohésion des noyaux atomiques. L'interaction nucléaire faible agit entre deux particules en contact l'une de l'autre. Elle est responsable des réactions de fusion et de la radioactivité bêta (résultat de la désintégration d'un neutron en proton et électron ou d'un proton en neutron et positon). La gravitation, attractive et de portée infinie, est d'une intensité très faible. Enfin, l'interaction électromagnétique assure la cohésion des atomes et des molécules, gouverne toutes les réactions chimiques, les phénomènes optiques et le comportement des charges électriques. C'est la seule force qui compte à l'échelle nanométrique.

## Info +

• Le gecko est un petit lézard capable de marcher au plafond ! Ses pieds, recouverts de millions de poils, qui se terminent eux-mêmes par des poils plus petits (200 nm) lui donnent cette super-adhèrece ; la force qui s'exerce entre chaque poil et le mur est faible, mais il y en a des milliers !



**Nanosciences :** C'est l'ensemble des recherches visant à étudier, comprendre et reproduire les phénomènes, lois et propriétés apparaissant dans les objets de dimensions nanométriques. Pourquoi et dans quelles conditions la matière s'organise-t-elle spontanément en nanostructures ? Quel est le lien entre la structure d'un matériau à l'échelle nanométrique et ses propriétés physico-chimiques ?



Microscope électronique en transmission

**Nanotechnologies :** Elles regroupent les instruments et techniques de conception, caractérisation et fabrication d'objets et systèmes exploitant les phénomènes liés à l'échelle nanométrique, et le développement d'applications dérivées.

## Info +

- La coupe de Lycurgus (IV<sup>e</sup> siècle après JC) est composée de verre coloré par des nanoparticules métalliques.
- Le noir de carbone, base de l'encre de Chine, est aussi constitué de nanoparticules !
- Les vitraux de la basilique Saint-Urbain à Troyes, construite au Moyen-Age, contiennent des nanoparticules d'argent et d'or, qui leur donnent leur aspect si particulier.

## Qu'est-ce que le nanomonde ?

Le nanomètre, c'est un milliardième de mètre ( $10^{-9}$  m), soit 50 000 fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu ou 10 fois plus gros (seulement) qu'un atome. Dans la Nature, cette dimension est courante : les atomes s'assemblent pour former des molécules ou des protéines. En descendant à cette échelle, les chercheurs manipulent la matière atome par atome, l'élaborent, améliorent ses propriétés chimiques, physiques ou électroniques. Depuis quelques dizaines d'années, le nanomonde ouvre de nouvelles perspectives de recherche, de la plus fondamentale (on parle de nano-

sciences) à ses applications dans le domaine des nanotechnologies.

Pour cela, les chercheurs empruntent deux voies :

- **descendante** « top-down » : la miniaturisation des objets est poussée à l'extrême, et doit alors prendre en compte les phénomènes qui relèvent de la physique **quantique**.
- **ascendante** « bottom-up » : il s'agit d'organiser la matière à partir de « briques de base », de l'assembler atome par atome.

Le comportement des objets dépend de leur taille. A l'échelle nanométrique, leur surface est immense par rapport à leur volume ; les chercheurs essaient

de tirer parti de ce phénomène pour améliorer les échanges, l'adhérence ou certaines réactions chimiques.

### La Nature en exemple

Les chimistes le savent bien : certains atomes et molécules se lient spontanément. En dirigeant ces réactions, ils arrivent à synthétiser des molécules complexes ; mais ne peuvent aller au-delà. L'auto-assemblage spontané de petits objets, un autre phénomène naturel, pourrait les aider. Les exemples ne manquent pas dans la Nature, par exemple les cristaux (édifices ordonnés d'atomes qui croissent tout seuls) ou les émulsions (comme celle formée par l'eau et l'huile)...



Richard Philips Feynman (1918-1988)

Physicien, spécialiste en mécanique quantique. Il est le premier à avoir émis l'hypothèse que l'homme pourrait manipuler les atomes un par un, les utiliser pour stocker de l'information ou créer des systèmes fonctionnels en microélectronique. Il a reçu le Prix Nobel de Physique en 1965.

## Lexique :

**Quantique :** La physique quantique est un ensemble de théories physiques nées au XX<sup>e</sup> siècle qui, comme la théorie de la relativité, marquent une rupture avec la physique classique. Elle décrit le comportement des atomes et des particules, très différent de l'environnement macroscopique.

## En savoir +

- À lire le livret thématique n° 18 « Le Nanomonde » paru en 2008 avec le quiz et sa version anglaise « The nanoworld ».



Dépôt de couches nanométriques.

© PF.Grosjean/CEA

© P.Stroppa/CEA

# Des outils et des hommes



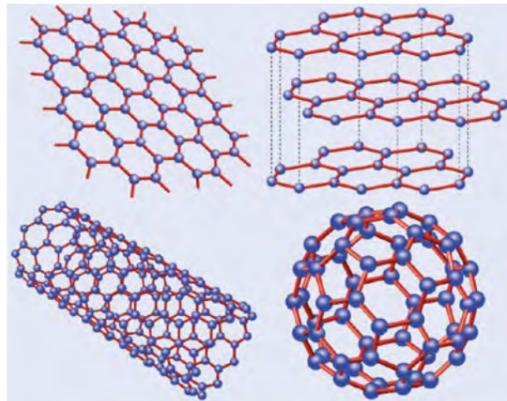
Le dépôt chimique en phase vapeur est une méthode de dépôt, généralement sous vide, de films minces, à partir de précurseurs gazeux. Ce réacteur CVD (pour Chemical Vapor Deposition) sert à la synthèse de nanomatériaux comme le graphène, des microfils de silicium... D'autres réacteurs permettent la croissance de nanotubes de carbone, en monocouches ou couches superposées.

PF.Grosjean/CEA

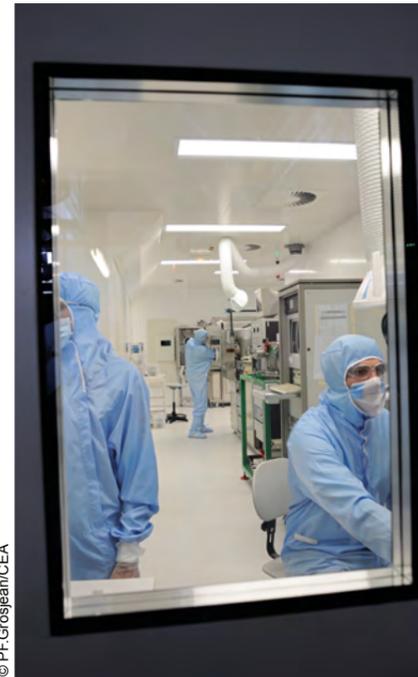
## Les briques élémentaires, exemple du carbone

Le carbone peut se présenter sous forme cristalline - graphite et diamant. Ses atomes peuvent aussi s'organiser en tapis, on parle alors de graphène. Les fullerènes sont des molécules sphériques de moins d'1 nm de diamètre, formées d'atomes de carbone disposés en hexagones ou en pentagones. Les nanotubes sont des feuillets de carbone enroulés sur eux-mêmes de façon à former des cylindres. Ils ont des diamètres de 2 à 30 nm et leur longueur peut atteindre plusieurs  $\mu\text{m}$ . Ils présentent des propriétés mécaniques et électriques intéressantes pour de nombreuses applications industrielles :

- **100 fois plus résistants et 6 fois plus légers que l'acier**, ils peuvent remplacer les fibres de carbone des raquettes de tennis, clubs de golf...
- **Excellents conducteurs électriques** ou semi-conducteurs, en fonction de l'angle de l'enroulement du feuillet, ils pourront être utilisés comme nanofils électriques ou nano-électrodes pour les écrans plats, ordinateurs...



© DR



© PF.Grosjean/CEA

## Salles blanches

Fabriquer ou caractériser des nano-objets doit se faire dans une ambiance ne contenant pas plus de 10 à 100 particules en suspension par  $\text{m}^3$  d'air (versus 1 million à l'extérieur). Pour obtenir ce niveau de propreté, l'air circule à travers des filtres, 600 fois par heure. Il faut aussi protéger l'environnement des poussières importées par l'homme, d'où la combinaison intégrale, le masque et les gants revêtus par chaque chercheur et technicien avant leur entrée en salle « blanche ».

## La nanosécurité

Les nanomatériaux sont-ils dangereux ? Comment se comportent-ils dans l'organisme ? Provoquent-ils des réactions ? Comment vieillissent-ils ?

Pour répondre à toutes ces questions de protection et de sécurité, une plateforme de recherche a été mise en place à Grenoble pour étudier leur éventuelle **toxicité**. Ses travaux portent sur le cycle de vie des nanomatériaux, leur **toxicologie** et leur écotoxicologie, les procédés industriels de fabrication et l'hygiène associée, leur caractérisation, leur mesure et le développement de méthodes de référence.

Elle regroupe des équipes pluridisciplinaires : médecins, biologistes, pharmaciens, techniciens, ingénieurs et chercheurs.

Ceux-ci disposent d'outils performants et de démonstrateurs sécurisés permettant d'anticiper les problématiques industrielles et environnementales de fabrication et de mise en œuvre des nanomatériaux.



© D.Morel/CEA

Mesure de l'efficacité d'un équipement de protection individuelle.

### Lexique :

**Toxicité :** Capacité d'une substance à provoquer, selon la dose, des effets néfastes et mauvais pour la santé, chez toute forme de vie.

**Toxicologie :** Science étudiant les substances toxiques, leurs sources et leurs conséquences sur les organismes vivants et l'environnement (écotoxicologie).

### Info +

• En 1989, le physicien américain Don Eigler a écrit les trois lettres **IBM** avec 35 atomes de xénon sur une surface de nickel grâce à un microscope à force atomique.

## Caractérisation et élaboration

Manipuler et caractériser des objets aussi petits nécessite de développer des microscopes de plus en plus puissants. Ces instruments sont des géants par rapport aux objets observés.

### Le microscope optique



Il permet les observations de détails, depuis 100  $\mu\text{m}$  jusqu'à 0,5  $\mu\text{m}$  ; sa résolution est limitée par la longueur d'onde des photons (0,1  $\mu\text{m}$ ). Il n'est adapté qu'aux objets plats.

### Le microscope électronique à balayage (MEB)



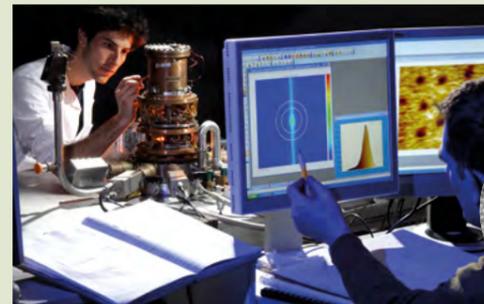
Dans un microscope électronique à balayage, les photons de lumière sont remplacés par un faisceau d'électrons, de longueur d'onde plus petite. L'image est construite point par point, suivant le balayage de l'objet par une sonde. Il est adapté aux objets en volume et de formes complexes. Il permet des images jusqu'à des résolutions nanométriques, mais implique de manipuler les objets sous vide.

### Le microscope électronique en transmission (MET)



Le plus puissant des microscopes électroniques, il fournit des images directes des structures atomiques de cristaux, la distance entre les colonnes atomiques étant de 0,1 nm. Pour cela, le faisceau d'électrons traverse l'échantillon, qui doit être très fin, avant d'être détecté sur une caméra.

### Le microscope à effet tunnel



Il comporte une pointe métallique extrêmement fine qui permet de cartographier, atome par atome, la surface d'un matériau conducteur. Une tension électrique, créant un courant d'électrons, est exercée entre la pointe et la surface, séparées de quelques nanomètres. Les variations recueillies traduisent en image le relief du matériau.

### Le microscope à force atomique



Il permet de caractériser la surface de tous les matériaux : céramiques, polymères, métaux, poudres ou biologiques... de manière mécanique. La pointe est fixée sur un bras de levier flexible et balaie la surface du matériau à très faible distance. La déformation du levier est mesurée par un photodétecteur et permet de modéliser la cartographie de l'objet.



**Emmanuel Hadji**  
Responsable du Laboratoire nano-électronique, photonique et structures

« En nanosciences, les chercheurs doivent comprendre, expérimenter, tester leurs intuitions... et ainsi faire avancer la science. »

## Les Savanturiers : Quelles sont les études menées dans votre laboratoire ?

**Emmanuel Hadji** : Nous faisons de la recherche fondamentale, pour comprendre ce qui se passe dans la matière lorsqu'elle est réduite à l'échelle nanométrique. Plus particulièrement, nous imaginons, synthétisons des nano-objets en silicium et étudions leurs propriétés électroniques. Les connaissances nécessaires pour cela sont : physique des matériaux et de la matière condensée, électronique, chimie... Les nanosciences sont nées avec l'apparition d'outils nouveaux, qui ont permis d'explorer le nanomonde, de passer du domaine des microstructures à celui des nanostructures, ainsi que l'avait prédit Richard Philips Feynman.

## Comment est organisé le laboratoire ?

Nous avons besoin d'outils spécifiques pour fabriquer la matière à l'échelle nanométrique, par exemple la synthétiser en « empilant » des atomes, et étudier ces nano-objets (« communiquer » avec eux). La plateforme d'expérimentation est au cœur du laboratoire. Comme dans un atelier d'horloger, elle constitue un « terrain de jeu » pour les chercheurs ; ils peuvent y exprimer leur créativité, inventer, expérimenter, tester leurs intuitions... et ainsi faire avancer la science. Dans cet espace sont disponibles de nombreux outils de nanofabrication (chimie, réacteur de dépôt) et de synthèse... ainsi que divers bancs de photonique.

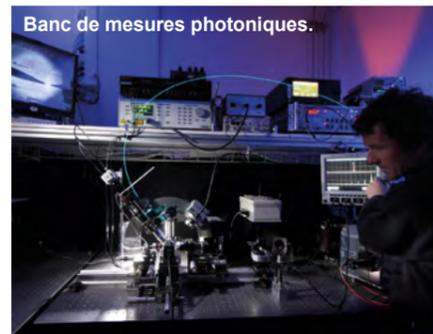
## Qu'est-ce qu'un chercheur en nanoscience ?

Le travail du chercheur est la combinaison de deux approches : comprendre ce qui se passe, quels sont les phénomènes physiques, et imaginer ce qu'il manque et ce à quoi cela pourrait servir. Par exemple, nous testons la capacité de « nano-sapins » à stocker de l'énergie sous forme électro-chimique. Cela demande de puiser dans ses connaissances acquises lors des études, mais aussi au long de sa vie de chercheur, par

exemple à l'occasion de conférences, d'avoir de la curiosité, l'envie de comprendre, de la ténacité, de l'intuition mais aussi de l'indépendance (d'esprit et de travail) et de l'initiative. Il est à la fois solitaire (il faut se prendre en charge, se poser des questions...) et en équipe (pour combiner les connaissances et se questionner, pour réagir et rebondir à partir des résultats des collègues).

## Formation :

- Bac S
- École d'ingénieur INSA de Lyon - spécialité Physique des semi-conducteurs
- Thèse en Photonique
- Post-doc en Norvège



Banc de mesures photoniques.

© P. Avavian/CEA



**Laure Guetaz**  
Microscopiste

« On a deux passions, les techniques de microscopie et la compréhension des phénomènes »

## Quel est votre outil de prédilection ? Pourquoi ?

**Laure Guetaz** : Microscopiste, je regarde la structure des matériaux jusqu'à leur échelle atomique. Je travaille avec des microscopes électroniques ; les photons des microscopes optiques sont remplacés par des électrons. Comme ils ont une longueur d'onde plus petite, les agrandissements peuvent atteindre plusieurs millions et donc une résolution à l'échelle atomique (on peut voir l'agencement des atomes les uns avec les autres). Des progrès importants ont encore été faits ces dernières années sur l'optique des microscopes et on peut maintenant observer des atomes séparés de moins d'1 **angström**, contre 2 angströms il y a 15 ans. Depuis plus de 20 ans,

je suis impressionnée à la vue des **colonnes atomiques**. Pour arriver à faire de telles images, il faut comprendre les phénomènes optiques, maîtriser les microscopes et les régler au plus juste.

## Quel est votre principal sujet d'étude ?

J'examine les nano-objets fabriqués au CEA (nanoparticules, nanotubes...) afin de contrôler si le résultat est conforme au souhait des chercheurs. Je caractérise des nano-objets afin de comprendre les propriétés qui dépendent de leur structure. Niveau applications, j'étudie en particulier les catalyseurs des piles à combustible. Puisque les industriels veulent réduire la part de platine utilisée et le remplacer par exemple par un alliage platine-nickel, il faut savoir où et comment disposer ces éléments, mettre le platine qui catalyse en surface. Les microscopes électroniques servent aussi en biologie, afin d'étudier des virus et des cellules, les synapses du cerveau par exemple. Dans ce cadre, il faut doser le faisceau d'électrons pour qu'il n'endommage pas l'échantillon.

## Comment préparez-vous les échantillons ?

Le microscope à balayage voit la surface des échantillons alors que le faisceau d'électrons du microscope en transmission doit le traverser. Dans ce cas, il faut que l'épaisseur de celui-ci soit de l'ordre de 100 nm et nous devons l'amincir afin de le rendre le plus fin possible.

## Formation :

- Bac S
- Ecole ingénieur INPG – spécialité Matériaux
- Thèse en Science des matériaux



Salle de nanocaractérisation.

© P. Avavian/CEA



**Fabrice Emieux**  
Technicien Laboratoire d'élaboration de couches minces

« Nous assurons la partie Développement de process pour l'élaboration de couches minces. »

## Les Savanturiers : En quoi consiste votre activité ?

**Fabrice Emieux** : L'élaboration de couches minces (de quelques angströms à quelques  $\mu\text{m}$ ) se fait dans des équipements spécifiques : de grosses enceintes métalliques de dépôt sous vide, couplées à un générateur plasma et un système de chauffage. Il existe deux techniques de dépôt : physique ou chimique. Selon l'application visée, nous travaillons sur différents types de substrats : céramique, silicium, verre, titane, plastique sur lesquels nous déposons des métaux, oxydes, nitrures... Nous assurons la partie développement de process et réalisation de dispositifs de tests.

## Travaillez-vous sur une application particulière ?

Nous étudions le carbone sous différentes formes, mais la plus utilisée est le graphène (tapis monocouche d'atomes de carbone). Au laboratoire, nous élaborons des cellules solaires complètes et cherchons à remplacer le matériau transparent conducteur en face avant des cellules. Le graphène est intéressant : en monocouche, il n'absorbe que 2 %

du rayonnement solaire. Mais il nous faut travailler sur sa conductivité électrique en le dopant, avec des atomes de bore par exemple. Nous caractérisons les matériaux et testons aussi la cellule dans son ensemble sous une lampe spéciale qui simule l'ensoleillement réel. Nous élaborons aussi des nanotubes de carbone. Ceux-ci servent en nanoélectronique ou pour créer des « câbles » nanométriques ; dans ce dernier cas, il faut les torsader sur une grande longueur.

## Dans quel environnement travaillez-vous ?

L'élaboration et les tests se déroulent en salle blanche, afin de limiter les poussières qui pourraient impacter les performances des matériaux que nous créons. Nous sommes autonomes pour les tests électriques et d'éclairage et utilisons les moyens de la plateforme de nanocaractérisation, en particulier les microscopes électroniques à balayage.

## Qui sont vos partenaires ?

Au sein du laboratoire, nous travaillons avec des ingénieurs chercheurs et des doctorants sur les méthodes d'élaboration et de caractérisation. Nous interagissons aussi avec d'autres laboratoires de recherche et des industriels qui nous font part de leurs besoins spécifiques de développement.

## Formation :

- Bac S
- DUT Mesures Physiques
- Maîtrise en Science des matériaux

## Lexique :

**Angström** : Unité de longueur équivalente à 0,1 nm soit  $10^{-10}$  m.

**Colonne atomique** : En microscopie électronique en transmission, l'image correspond à la projection de la structure atomique du matériau, donc le plus souvent ce n'est pas un atome que l'on voit mais la projection d'une colonne d'atomes de la structure.

## Plateforme Minatec

Depuis juin 2006, Minatec est un campus d'innovation unique en Europe dans le domaine des micro et nanotechnologies. Chercheurs du CEA, étudiants, industriels et spécialistes du transfert technologique ont à leur disposition des installations exceptionnelles, dont 10 000 m<sup>2</sup> de salles blanches et une plateforme de caractérisation. Minatec a donné naissance à de nombreuses start-up dans les secteurs de l'optronique, des biotechnologies, des composants, de la conception de circuits, de la capture de mouvement, etc.



© P.F. Grosjean/CEA

## Plateforme Nano-Innov

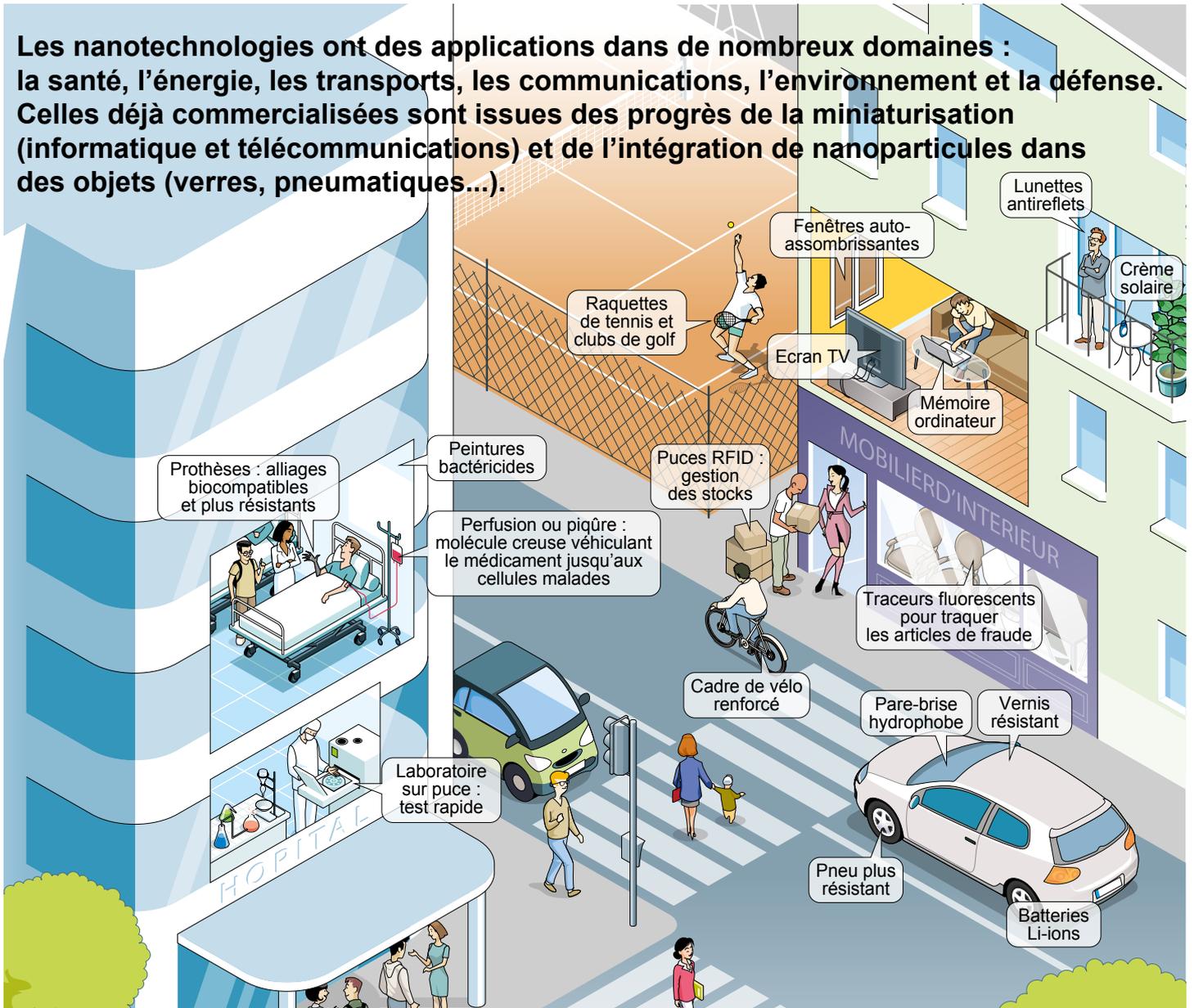
Réunir dans une démarche interdisciplinaire des talents complémentaires pour concevoir les systèmes du futur, telle est la vocation du nouveau centre d'intégration Nano-Innov Paris Région, inauguré en février 2012. Il accueillera des chercheurs du CEA, de l'Institut Télécom, des équipes de la Faculté de Pharmacie et de l'Université Paris-Sud spécialisées dans les nano-médicaments, ainsi que des ingénieurs spécialistes en développement logiciel, architecture et systèmes embarqués ou en développement de nanotechnologies, qui œuvreront à leur intégration dans les systèmes innovants.



© P. Stoppa/CEA

# Des nanomatériaux au quotidien

Les nanotechnologies ont des applications dans de nombreux domaines : la santé, l'énergie, les transports, les communications, l'environnement et la défense. Celles déjà commercialisées sont issues des progrès de la miniaturisation (informatique et télécommunications) et de l'intégration de nanoparticules dans des objets (verres, pneumatiques...).



## En savoir +

● À découvrir « Les nanos vont-elles changer notre vie ? 82 questions à Louis Laurent, physicien » - Collection On se bouge ! paru aux Spécifique Editions.

## Sites :

CEA jeunes : [www.cea.fr/jeunes](http://www.cea.fr/jeunes)

Retrouvez les Savanturiers en version web :

[www.cea.fr/le\\_cea/publications/les\\_savanturiers/](http://www.cea.fr/le_cea/publications/les_savanturiers/)

A découvrir en vidéo et en fiche le métier de chercheur en nanosciences et l'environnement en salles blanches  
<http://portail.cea.fr/comprendre/jeunes/Pages/metiers>

## Nano@school

Au sein de Minatec, le programme Nano@school est un dispositif pédagogique innovant visant à faire découvrir le monde de la recherche fondamentale et appliquée sur les nanotechnologies, par la formation et l'expérimentation. Il s'adresse à différents publics de l'enseignement secondaire (élèves de lycées en classes scientifiques et professeurs de sciences physiques et chimie). Chaque année, une quinzaine de classes, dont deux internationales (soit près de 400 élèves et 40 enseignants), est accueillie. En une journée, chacun découvre trois à quatre plateformes (ex : salle blanche, nanomonde, microscopie, biotechnologies, photovoltaïque, télécoms...) et a l'opportunité de manipuler du matériel de pointe en situation réelle, encadré par des professionnels.

Ce projet éducatif, original et unique en France, est coordonné et organisé en partenariat étroit entre le CIME Nanotech, Grenoble INP et l'UJF, le Rectorat de l'Académie de Grenoble et le CEA.  
<http://www.nanoatschool.org>



Éditeur : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, RCS Paris B 775 685 019  
 Directeur de la publication : Xavier Clément  
 Ont participé à ce numéro : Fabrice Emieux, Laure Guetaz, Emmanuel Hadji, Florence Klotz, Lucia Le Clech, Francine Papillon, Stéphanie Thollon, Marie Toussaint.  
 Infographies : Antoine Levesque  
 Image têtère : P.Avavian/CEA - Portraits pages 6-7 : M.Klotz  
 Création, réalisation et impression : NPO\* - [www.nepasoublier.fr](http://www.nepasoublier.fr) - Décembre 2015  
 ISSN 2271-6262

Nous remercions Fabienne Chauvière d'avoir accepté que nous empruntions le titre de son émission.