

*La physique  
pour mieux  
comprendre  
le monde*

Année mondiale de la physique 2005

# La Lumière et la Matière



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

## Introduction

*Depuis la torche de l'époque des cavernes jusqu'au laser en passant par la lampe à incandescence, la maîtrise de la lumière a été constamment une source de progrès pour l'humanité. Pourtant, il a fallu des siècles aux plus grands esprits comme Newton, Fresnel ou Einstein pour bien comprendre la nature réelle, étonnamment complexe, de la lumière. Les physiciens savent aujourd'hui utiliser ses multiples propriétés pour modeler la matière et l'adapter à leurs besoins. De minuscules diodes lasers lisent nos disques compacts, des fibres optiques transmettent des informations à des kilomètres de distance, des lasers mesurent la pollution dans l'atmosphère, la lumière du Soleil nous sert à chauffer nos habitations...*

*Nos progrès dans la compréhension de la matière et de ses multiples états n'ont pas été moins impressionnants, depuis l'époque des forgerons de Tolède ou de Bernard Palissy et ses émaux. On découvre sans cesse de nouveaux matériaux aux propriétés extraordinaires, comme des cristaux liquides pour nos écrans de télévision ou des films minces magnétiques pour les mémoires des ordinateurs. Les jeux de la lumière avec la matière nous introduisent aujourd'hui dans le monde fascinant des nanotechnologies où l'on crée des systèmes à de très petites*

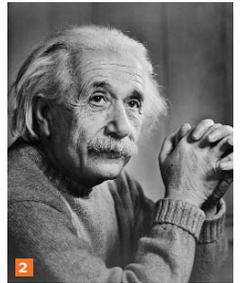
*échelles, voisines de la taille des atomes, susceptibles de bouleverser une nouvelle fois notre vie quotidienne dans un futur proche.*

## La Lumière

Sa nature est restée longtemps controversée. Elle fut considérée comme une onde à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle par Augustin Fresnel (1788-1827) (image 1), qui put ainsi interpréter les expériences d'interférences et de diffraction.



1



2

Albert Einstein (image 2) montra en 1905 que certaines observations encore inexplicables, tel l'effet photoélectrique, trouvaient une interprétation simple si l'on considérait que la lumière était constituée de corpuscules « quanta d'énergie », les photons. Ce double aspect de la lumière s'intégra alors parfaitement avec la mécanique

1/ Augustin Fresnel.

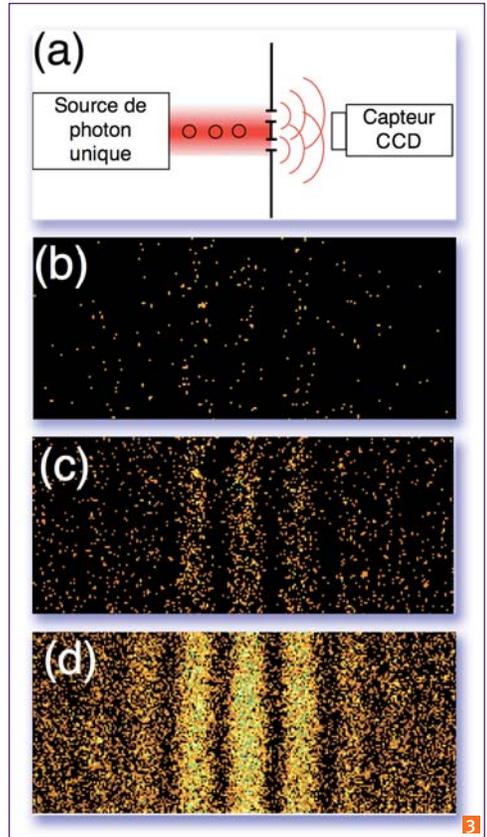
2/ Albert Einstein.



quantique. Dans cette théorie, mise au point au début du  $xx^e$  siècle, les notions d'onde et de particule, qui sont séparées en mécanique classique, deviennent deux facettes d'un même phénomène. Selon le contexte expérimental, la lumière peut ainsi se comporter comme des particules ou comme une onde en produisant notamment des interférences (image 3).

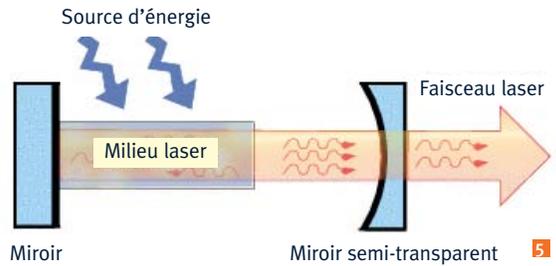
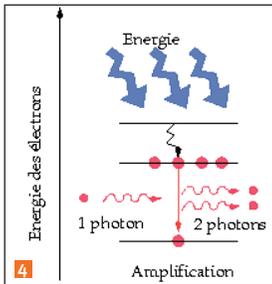
### LE L.A.S.E.R. (LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION)

Les atomes ou molécules sont excités par un apport d'énergie extérieure (électrique, lumineuse...) (image 4). L'énergie stockée dans les centres luminescents est émise par stimulation par un photon de même énergie (transistor optique). Il en résulte une amplification du nombre de photons produits par le milieu. L'effet laser est alors créé par des allers et retours de la lumière émise dans la cavité (fermée par des miroirs). Au-delà d'une certaine puissance accumulée dans la cavité, le faisceau laser s'échappe du côté du miroir le moins réfléchissant (image 5).



3/ Expérience réalisée à l'École Normale Supérieure de Cachan en 2005 montrant la construction d'une figure d'interférences photon par photon (franges en fausse couleur). En effet, la source de lumière utilisée est spécialement conçue pour produire les photons un par un à la demande. Le « biprisme de Fresnel » sépare le faisceau lumineux incident en deux parties, l'une est déviée vers le haut tandis que l'autre l'est vers le bas. Là où les deux parties se recouvrent, il apparaît des franges claires et sombres.





### Les applications multiples dans le quotidien

Le lecteur de disque numérique : CD, DVD, HDVD. La surface métallique des disques est gravée de très petites dépressions. La variation de l'intensité de réflexion entre les trous et la surface suffit pour lire l'information contenue. Plus le trou est petit, plus la capacité de stockage est grande. C'est pourquoi il faut concentrer très fortement la lumière et aussi utiliser des lasers de courte longueur d'onde, dans le bleu plutôt que dans le rouge (image 6).

	CD	DVD	Blu-ray Disc
Diode laser	GaAlAs	GaAlInP	GaN
$\lambda$ (nm)	780	650 / 635	405
O.N.	0.45	0.6	0.85

6

Le faisceau laser est très puissant. Il est utilisé dans l'industrie pour la découpe et le soudage et aussi pour le nettoyage des œuvres d'art. Il a alors l'avantage d'éliminer uniquement le dépôt dû à l'âge et à la pollution (image 7).



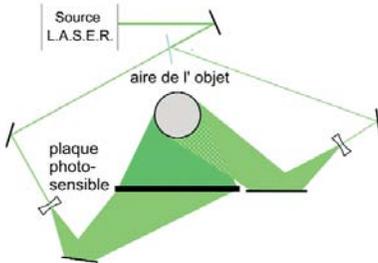
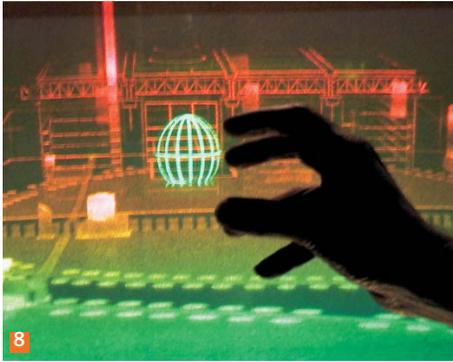
4/ L'apport d'énergie extérieure crée une plus grande population dans le niveau supérieur que dans le niveau inférieur (condition d'inversion de population). Un photon d'énergie et de direction données stimule la retombée de la population vers le niveau inférieur en émettant un photon identique au premier (amplification).

5/ Le milieu est constitué d'atomes ou de molécules dans un gaz, un liquide ou un solide. À chaque passage du faisceau dans le milieu, il est amplifié par émission stimulée.

6/ Caractéristiques comparées montrant l'évolution des différentes générations de systèmes de stockage optique (à partir de données Philips Research).  $\lambda$  est la longueur d'onde d'émission de la diode laser et O.N. est l'ouverture numérique de l'optique de focalisation.

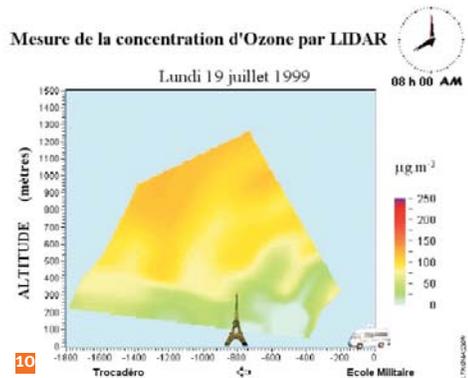
7/ Illustration des effets de nettoyage de statues par ablation laser (THALES Laser).

Une autre application possible est l'holographie ou la photo en 3 dimensions (images 8 et 9).



**Détection de la pollution de l'air : le Lidar**  
 Le Lidar est un radar utilisant des ondes optiques (laser) qui permet d'obtenir des cartographies de polluants atmosphériques à haute sensibilité et sur des distances de plusieurs kilomètres (image 10). Il exploite le principe de la

rétrodiffusion inélastique de la lumière laser, caractéristique des espèces chimiques rencontrées dans l'atmosphère. L'analyse de l'ozone et de ses précurseurs a permis récemment des avancées de premier plan dans la compréhension des phénomènes d'épisodes de pollution d'été. Pour étendre les possibilités des Lidars et détecter à distance tous les polluants simultanément, un programme franco-allemand, TéraMobile, développe de nouvelles méthodes de mesure. Elles sont basées sur l'utilisation d'impulsions laser ultra-brèves ( $100 \text{ fs} = 10^{-13} \text{ s}$ ) et ultra-intenses (de l'ordre du terawatt,  $10^{12} \text{ W}$ ). Ce type de laser pourrait également guider la foudre et servir de paratonnerre laser.



8/ Hologramme : La Cité des Sciences de La Villette. Crédit : Laserscene

9/ Schéma de principe d'un enregistrement d'hologramme : les deux faisceaux qui éclairent l'objet interfèrent, l'image est enregistrée sur la plaque photo. Crédit : Laserscene.

10/ Le L.I.D.A.R. Light Detection And Ranging.

### Le laser comme puissant télémètre

Le laser peut être utilisé également pour mesurer la distance Terre-Lune avec une très grande précision (image 11) mais aussi pour contrôler votre vitesse à l'aide d'un radar optique (image 12).



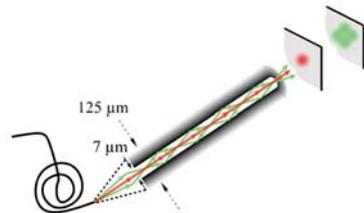
11



12

### LA FIBRE OPTIQUE : GUIDE DE LUMIÈRE

Pourquoi un fil aussi fin qu'un cheveu peut-il transporter de la lumière ? Dans un milieu transparent, comme le verre par exemple, la lumière se propage moins vite que dans l'air parce que son indice de réfraction est supérieur à celui de l'air. Sous incidence oblique, un rayon lumineux pénétrant dans un milieu plus réfringent que l'air est dévié de sa trajectoire initiale et, pour un angle d'incidence maximum, il sera réfléchi à l'interface air/verre. Des réflexions successives expliquent la propagation de la lumière dans une fibre optique de verre (image 13).



13

Un verre de vitre ordinaire chauffé à haute température permet de « couler » une fibre. La lumière sera bien guidée mais aucune lumière ne sortira du bout de la fibre. Ce sont les techniques de dépôt de matière très pure qui ont permis de fabriquer des millions de kilomètres

11/ Photographie du site de l'Observatoire de Côte d'Azur et du dôme accueillant le télémètre laser mesurant la distance Terre-Lune (laser Nd:YAG doublé en fréquence).

12/ Radar optique. Crédit : SFIM.

13/ Propagation monomode (rouge) et multimode (vert) dans une fibre optique. Crédit : CNRS-LPCML.



de fibres optiques en verre de silice de très grande qualité. Aujourd'hui, 1 % environ de la lumière injectée dans une fibre est facilement détectable au bout de 100 km !

### La fibre optique : un tuyau miniature pour 1 million de communications simultanées

Allo Bob, Marie speaking ... un temps mort = une liaison par satellite ; une réponse instantanée de Bob = une liaison sous-marine par fibre optique ! Lorsque la voix ou le signal électrique de l'ordinateur est codé, ce signal modulé (émetteur) alimente une source de lumière : une diode laser qui permet de coupler la lumière dans la fibre optique. Suivant la distance à parcourir, le signal optique peut être soit détecté directement soit amplifié une ou plusieurs fois. Arrivé à destination, le signal optique est détecté par le module inverse de l'émetteur.

Pour traverser les océans (« back bone »), le signal optique a besoin d'être amplifié (par des répéteurs) car son intensité devient trop faible pour être exploitée. Depuis 1995, une nouvelle génération de répéteur tout optique est entrée en fonctionnement. Son principe est basé sur le concept de l'émission stimulée introduite par Einstein. Cet amplificateur est constitué d'une fibre optique dopée (contenant une impureté spécifique : l'ion erbium). Un fort apport d'énergie à la fibre dopée (pompage optique par une diode laser) crée la condition de stimulation de l'émission de l'impureté par le signal optique. Il en résulte la production d'une augmentation impressionnante de l'intensité du signal optique d'un facteur de 1000 à 10 000. Une augmentation considérable de la capacité des transmissions est réalisée en couplant plusieurs longueurs d'onde

voisines dans la fibre : il s'agit du multiplexage en longueur d'onde (4, 8, ..., 32). Plus extraordinaire, les amplificateurs à fibres optiques peuvent amplifier également toutes ces longueurs d'onde... d'où l'explosion d'Internet (image 14) !



14/ Câbles optiques sous-marins.  
Crédit : Alcatel.

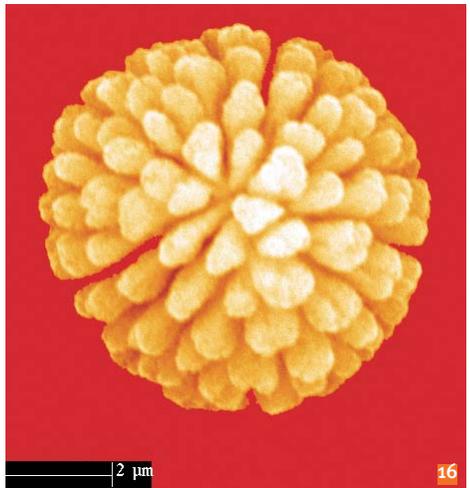
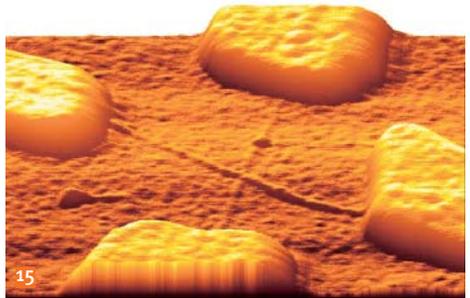


## La Matière

L'âge de pierre, l'âge du bronze, l'âge du fer, ... ces noms consacrent le rôle crucial joué par les matériaux dans l'histoire de l'Humanité. La compréhension scientifique de la matière qui nous entoure\* est pourtant assez récente. Pendant très longtemps, les artisans se sont fondés sur des savoir-faire empiriques et procédaient par essais et erreurs – Bernard Palissy a consacré 20 ans de sa vie et risqué la misère pour découvrir le secret des émaux !

Cette situation a totalement changé, et les sciences de la Matière sont maintenant au cœur de notre vie courante, des téléphones portables aux colles à hautes performances. L'augmentation constante de la puissance des ordinateurs et la baisse de leur prix ont ainsi été rendues possibles par les progrès en physique et en chimie du silicium, le matériau des micro-processeurs et des mémoires vives. Les historiens futurs pourraient bien baptiser notre époque « l'âge du silicium » ! Et bientôt de nouveaux composants encore plus minuscules,

tels les nanotubes de carbone, formés d'un ou quelques feuillets atomiques, risquent fort de révolutionner ce domaine (images 15 et 16).



\* Composée d'électrons, de protons et de neutrons, par opposition à la « matière noire » qui intrigue les astrophysiciens, voir la plaquette « L' Univers ».

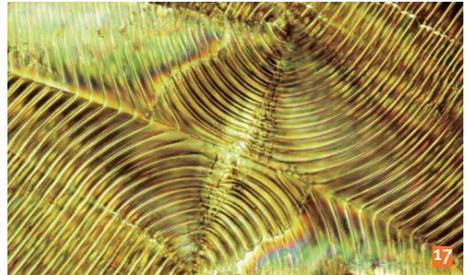
15/ Contact entre deux nanotubes de carbone et des électrodes d'or. Ces nanotubes peuvent contribuer à miniaturiser les composants électroniques du futur. Crédit : Groupe de physique mésoscopique, L. Pierre-Aigrain (CNRS-ENS).

16/ Croissance de nanotubes par dépôt de vapeur sur un filament chaud. Crédit : A-M. Bonnot (CNRS-LEPES).



## LA MATIÈRE DANS TOUS SES ÉTATS

Le mot « matière » évoque immédiatement les trois états usuels : solide, liquide et gaz. Qu'est-ce qui les distingue ? La réponse paraît simple : un liquide coule, pas un solide, et un gaz occupe tout l'espace disponible. La réalité est plus complexe : le sable sec se met à couler au-dessus d'un certain angle d'inclinaison, et les propriétés d'un tas de sable sont si différentes de celles d'un solide qu'on parle d'« état granulaire ». Il existe aussi des « cristaux liquides », où les molécules ne forment pas un réseau régulier, comme dans un cristal usuel, mais gardent quand même un ordre moyen à longue distance dans leurs orientations. Les cristaux liquides ont des propriétés optiques remarquables, et ils sont utilisés dans les écrans plats LCD pour ordinateurs et téléviseurs (image 17). Il existe en fait de nombreux états de la matière, caractérisés par des propriétés spécifiques. Le fer, par exemple, est magnétique à la température ambiante, mais cesse de l'être si on le chauffe au-dessus de 770 °C. L'étude des différentes formes de magnétisme constitue un domaine très actif, et les physiciens créent des composés de plus en plus



élaborés. Albert Fert et son équipe à l'université d'Orsay ont ainsi réussi à fabriquer en 1988 des multi couches (des « millefeuilles ») de fer et de chrome, dont la résistance électrique varie énormément en présence d'un champ magnétique. Ce phénomène de « magnéto-résistance géante » est maintenant exploité dans les mini-disques durs de baladeurs comme l'iPod.

Certains états de la matière n'apparaissent que dans des conditions très éloignées de notre environnement usuel. La Terre possède un noyau de fer magnétique, sous haute température et pression, mais est-il liquide ou solide ? \* Et comment expliquer que Jupiter, qui ne contient pas de fer ni d'autres métaux, possède elle

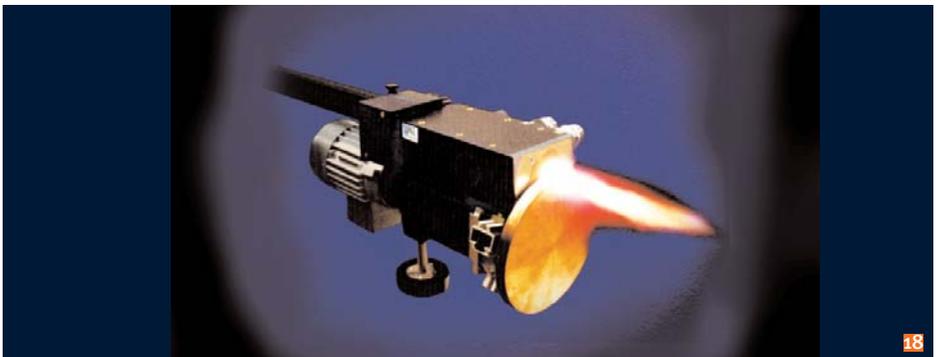
\* Voir la plaquette « La Terre et son environnement » pour la réponse.

17/ Défaut d'orientation de type « Conique focale » dans un cristal liquide.  
Crédit : M. Brunet (LCVN, CNRS-Université Montpellier 2).



aussi un champ magnétique ? Les planétologues pensent que son centre contient de l'hydrogène métallique liquide, à une température de 11 000 °C et une pression de 4 millions d'atmosphères. L'existence de cet état avait été prédite par Wigner dès 1935, mais il n'a pas encore été possible de le produire en laboratoire, c'est le grand défi pour les spécialistes des très hautes pressions ! L'hydrogène métallique est un exemple de l'état plasma : les électrons n'y sont plus liés aux noyaux, comme dans l'atome H ou dans l'hydrogène liquide moléculaire (celui qui sert de carburant aux fusées spatiales), mais ils se déplacent à peu près librement. D'autres exemples de plasmas sont plus familiers – les éclairs d'orage, les aurores boréales, le Soleil lui-

même, et aussi les tubes néons, les écrans plasma pour téléviseurs haut de gamme. L'application majeure espérée, à long terme, devrait être la production d'énergie par fusion contrôlée : le réacteur ITER qui sera construit à Cadarache (Bouches-du-Rhône) permettra d'étudier comment contrôler le plasma extrêmement chaud (plus de 100 millions de °C) assez longtemps pour obtenir la fusion entre les noyaux de deutérium et de tritium. Une application à plus court terme pourrait concerner l'environnement et le contrôle de la pollution, grâce aux « torches à plasma » qui permettent de décomposer la plupart des déchets à température élevée (30 000 °C), avec un minimum de nuisances (image 18).



18/ Plasma-Torch-IPP. Torche à plasma de 150 kW.

Crédit : Institut de physique des plasmas (Prague) et Université de Gand.



### Combien d'éléments ?

Les penseurs grecs se posaient déjà des questions sur la nature de la matière. Leucippe et Démocrite soutenaient qu'elle est composée de particules minuscules, les atomes, éternels et se mouvant dans le vide, mais différents par la taille et la forme. Pour Empédocle, suivi par Aristote, il existait quatre éléments fondamentaux : la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu, dont les proportions expliquaient les différences entre les corps (il faisait aussi appel à deux « principes », l'Amour et la Discorde, à l'origine de l'attraction ou de la répulsion entre les quatre éléments – l'Amour n'était donc pas le « 5<sup>e</sup> élément » !). Socrate, lui, avait jugé ces discussions trop spéculatives et s'en était désintéressé. C'est Démocrite qui était le plus près de la réalité, et les atomes existent bien, même s'il a fallu attendre 1911 et les expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien, confirmant les calculs d'Einstein, pour en avoir la preuve indubitable. Plus de 110 éléments sont maintenant répertoriés, les derniers découverts n'existent pas à l'état naturel car ils sont radioactifs et se désintègrent très rapidement. Les quatre éléments d'Empédocle, eux, correspondent plutôt aux états usuels – solide, liquide, gaz – plus l'état plasma pour le feu.

### UTILISER LA MATIÈRE : LA SAGA DES SUPRACONDUCTEURS

Record du monde battu ! En décembre 2003, le train expérimental japonais MLX01 a atteint 581 km/h. Ce « Superconducting Maglev Vehicle » « vole » quelques centimètres au-dessus de sa voie, grâce à l'effet de lévitation créé par des électroaimants en niobium-titane. Cet alliage est utilisé car sa résistance électrique s'annule à très basse température, ce qui permet d'obtenir des champs magnétiques très intenses.

C'est un physicien hollandais, Kammerlingh Onnes, qui a découvert ce phénomène de supraconductivité en 1911, dans le mercure en dessous de 4,2 °K, mais l'explication n'a été donnée qu'en 1957, en faisant appel à des notions avancées de mécanique quantique. Malgré un gros effort de recherche pendant les années 1960, les débouchés commerciaux se limitaient à des applications spécialisées, comme les aimants pour les grands accélérateurs de particules, ou récemment l'imagerie médicale (IRM). Et puis, en 1986, à la surprise générale, deux chercheurs de Zürich ont découvert une céramique, LaBaCuO, supraconductrice jusqu'à une température critique de 30 °K. Très vite, d'autres composés similaires



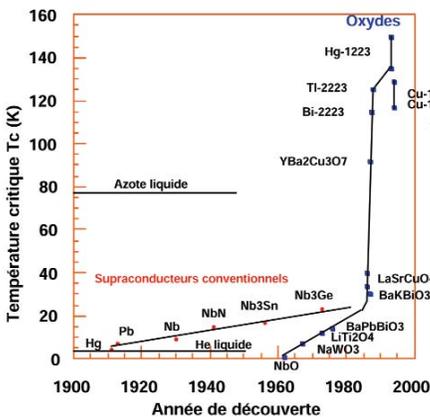
furent obtenus, et cette découverte a valu à ses auteurs le prix Nobel en 1987 (images 19 et 20).



19

Le succès commercial d'applications à grande échelle comme les trains dépendra beaucoup de la capacité de fabriquer ces matériaux en grande quantité à un coût acceptable. Il se sera passé près d'un siècle entre la découverte initiale et les retombées dans la vie quotidienne !

Cette histoire à rebondissements montre que la maîtrise des matériaux reste un art autant qu'une science, bien que les physiciens puissent prédire, dans certaines limites, les propriétés de composés qui n'ont encore jamais été fabriqués. Des surprises majeures comme celle des céramiques supraconductrices continuent de se produire, c'est ce qui rend la recherche dans ce domaine excitante !



20

## VOIR LES ATOMES

Les savants de l'Antiquité n'avaient aucun moyen d'observer la matière au niveau microscopique pour tester leurs hypothèses sur la matière, et du coup leurs discussions restaient stériles. C'est l'invention du microscope électronique, dans les années 1930, qui a permis d'atteindre l'échelle du nanomètre (milliardième de mètre), proche des tailles atomiques (voir la plaquette « La Physique et le Vivant »).

19/ Lévitiation d'une statuette du sculpteur Tanguy, au-dessus d'un lit de supraconducteur YBaCuO à la température de l'azote liquide (-196 °C). Crédit : photothèque CNRS.

20/ Évolution du record de température critique pour les supraconducteurs. Il dépasse maintenant largement la température de l'azote liquide.

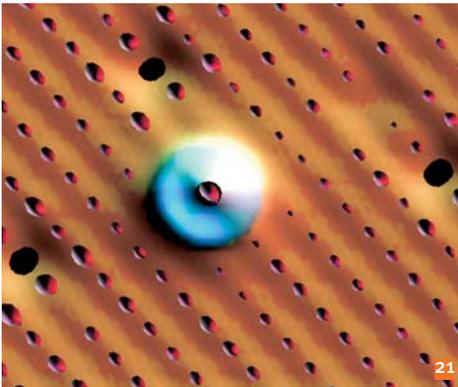


Plus récemment, de nouvelles méthodes, dites de « microscopie en champ proche », ont été mises au point, qui permettent d'étudier directement comment les atomes sont disposés sur des surfaces. La première de ces méthodes, la STM inventée en 1981 par Binnig et Rohrer à IBM Zürich, consiste à approcher d'une surface métallique une pointe extrêmement fine : si la pointe est suffisamment près (à moins d'un nanomètre), un courant passe à travers le vide, grâce à un effet prévu par la mécanique quantique et appelé de façon imagée « effet tunnel ». La mesure de ce courant permet de cartographier la surface atome par atome. Cette invention leur a valu le prix Nobel en 1986 (image 21).

Ils ont ensuite développé le microscope à force atomique (AFM), dont le principe est de mesurer la force que subit une pointe très proche d'une surface. Cela permet d'étudier des surfaces isolantes, mais la cartographie est moins précise. On parvient à mesurer des forces inférieures au picoNewton ( $10^{-12}$  N, soit le poids d'une bille d'or d'un micromètre de diamètre, ou encore celui d'une bactérie courante, *E. coli*), mais bien entendu, les vibrations et tous les effets parasites doivent être éliminés, ce qui présente de grandes difficultés expérimentales.

## MANIPULER LES ATOMES : À LA CONQUÊTE DU NANOMONDE

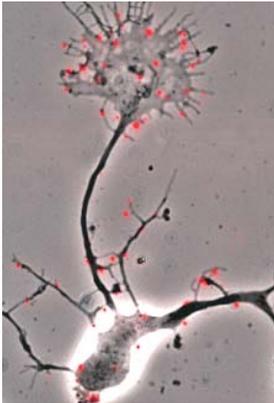
On parle beaucoup actuellement de nanosciences et de nanotechnologies, y compris dans les journaux économiques. En effet, de gros investissements sont consentis, en France comme dans la plupart des pays développés, pour maîtriser la matière à l'échelle du nanomètre, avec l'espoir de retombées majeures sur l'industrie, mais aussi dans le domaine de la santé. Une forte motivation vient de l'industrie des semi-conducteurs : pour fabriquer des composants encore plus rapides, il faut les miniaturiser



21/ Atome de xénon (tache bleu clair) sur une surface de nickel, vu par STM. Crédit : D.M. Eigler (IBM-Almaden).



toujours plus. Intel a annoncé des puces avec une finesse de trait de 65 nm, soit environ 300 atomes de silicium, mais pour atteindre des tailles très inférieures, il faudra exploiter les possibilités de la physique quantique : on sait déjà fabriquer en laboratoire des transistors à un seul électron, ainsi que des nanosources de lumière, les « points quantiques » (*quantum dots*), qui produisent un photon à la fois (image 22).



22

De nombreux chercheurs se sont lancés dans ce domaine, quand ils ont compris que les pointes des microscopes à



champ proche pouvaient être utilisées pour déplacer les atomes, un par un, et créer des structures artificielles de quelques dizaines ou centaines d'atomes. D'autres méthodes moins artisanales permettent maintenant de fabriquer des structures ayant des propriétés contrôlées, et de grands espoirs sont en particulier fondés sur les nanotubes de carbone et sur les « nanoplots » métalliques. La maîtrise totale de la matière ne paraît plus un rêve inaccessible, même si les obstacles restent nombreux (images 23 et 24). Dans un avenir pas trop lointain peut-être verrons-nous se réaliser la prophétie du grand physicien Richard Feynman en 1959 : faire tenir le contenu d'une encyclopédie sur une tête d'épingle !

22/ Visualisation de récepteurs membranaires d'un neurone vivant grâce à des points quantiques (rouges).

Crédit : C. Bouzigues (LKB-ENS).

23/ Microstructures pour les cristaux photoniques. En haut : opales de silice et de diamant ; en bas : piliers de diamant. Crédit : M. Bernard et A. Deneuveille (CNRS-LEPES).

24/ « Cage à électrons » triangulaire de cuivre (hauteur : un atome), vue par STM.

Crédit : P. Mallet et J.-Y. Veuillen (CNRS-LEPES).



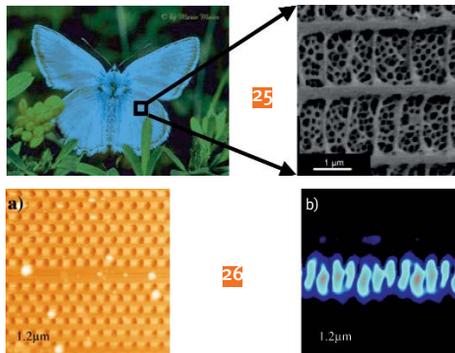
## Les jeux de la Lumière et de la Matière

### QUAND LA MATIÈRE CONTRÔLE LA LUMIÈRE : DES AILES DE PAPILLON AUX CRISTAUX PHOTONIQUES

Si les ailes de certains papillons sont bleues, cela n'est pas dû à un colorant mais à des structures nanométriques qui diffractent la lumière (image 25). Là encore la nature devance les nanotechnologies ! Les physiciens se sont rendu compte de l'impact considérable de ce résultat pour l'optique, puisque cela permet le contrôle total de la lumière. En effet, en fabriquant des structures périodiques à l'échelle nanométrique (un réseau de trous ordonnés dans un matériau homogène,

par exemple) on réalise des guides d'onde « diffractifs » pour les photons. C'est la raison pour laquelle on les dénomme communément « cristaux photoniques ».

Ces « cristaux » peuvent se comporter comme de véritables « isolants » pour la lumière (par analogie avec les propriétés électroniques) et empêcher sa propagation. On peut fabriquer ainsi de véritables cages à photons dont les dimensions sont nanométriques et réaliser les plus petits lasers au monde. Cette structuration périodique diffractive du matériau peut conduire à la modification et au contrôle de l'émission de lumière par les atomes, et ainsi permettre de réaliser des sources qui émettent la lumière photon par photon (image 26). Ces nouvelles



25/ Image d'une aile de papillon prise au microscope électronique.

26/ a) Image d'un guide à cristal photonique et b) visualisation à l'aide d'un microscope à champ proche optique de la lumière qui s'y propage. Collaboration LPM (INSA-CNRS), IMEC et de la plateforme NANOPTec.



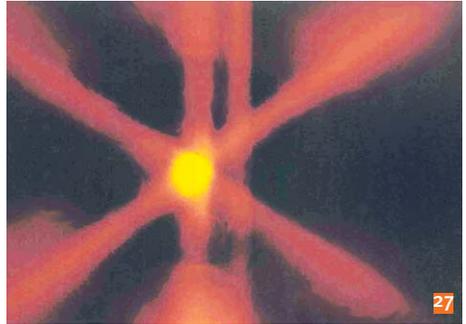
sources vont révolutionner les techniques de codage et de transmission d'information en garantissant leur parfaite confidentialité : c'est le domaine de la cryptographie quantique.

## QUAND LA LUMIÈRE CONTRÔLE LA MATIÈRE : LES ATOMES ULTRA-FROIDS ET LES CONDENSATS DE BOSE-EINSTEIN

La lumière laser permet de manipuler les atomes d'un gaz par l'intermédiaire de la force radiative qu'elle exerce lorsqu'elle est absorbée. Le prix Nobel a été décerné en 1997 à Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu et Bill Phillips, pour avoir démontré le principe du refroidissement des atomes par laser à des températures extrêmement basses, de l'ordre du millième de degré au-dessus du zéro absolu. Ils ont aussi montré qu'on pouvait piéger un nuage dilué de tels atomes froids dans des faisceaux lasers (image 27).

Les atomes froids sont maintenant utilisés dans les horloges atomiques, qui mesurent le temps avec une précision extraordinaire, avoisinant la seconde sur plusieurs millions d'années. La mesure précise du temps est indispensable pour le guidage des satellites et le positionnement sur Terre par le système GPS.

À des températures encore beaucoup plus froides, avoisinant le milliardième de degré

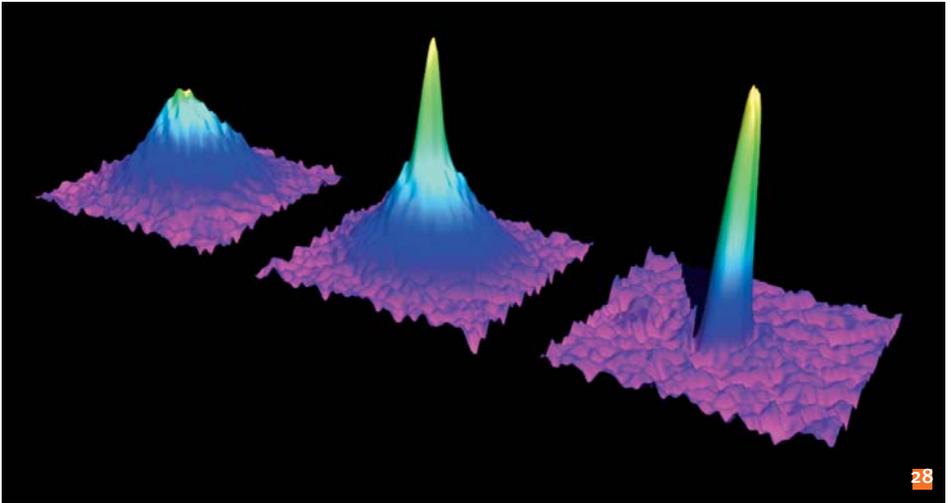


au-dessus du zéro absolu, de nouveaux phénomènes se produisent : les atomes d'un gaz dilué peuvent se condenser dans un nouvel état de la matière qu'on appelle condensat de Bose-Einstein. Einstein l'avait prédit en 1924, l'expérience l'a montré en 1995. Les atomes se regroupent tous dans le même état et adoptent un comportement collectif où ils se comportent tous ensemble comme s'ils étaient un seul atome (image 28).

À partir des condensats de Bose-Einstein, on peut extraire des faisceaux d'atomes qui ont tous les mêmes propriétés : on parle de « lasers à atomes » ou lasers à ondes de matière, qui sont aux atomes ce qu'un laser est aux photons. Leurs applications seront nombreuses ; on pense déjà à la lithographie. Les condensats piégés sur des puces par des microcircuits

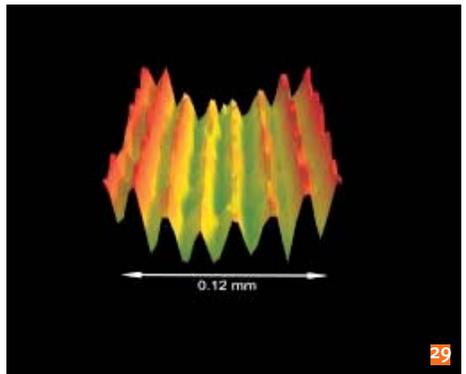
27/ Un petit nuage de quelques millions d'atomes de sodium piégés au centre d'un réseau lumineux créé par 6 faisceaux lasers ; les atomes lévitent dans le vide et sont comme englués dans la lumière ; on dit qu'ils sont pris dans une mélasse optique.





semblent promis à un bel avenir en microélectronique. Les condensats sont aussi des candidats possibles pour le calcul quantique du futur.

L' **image 29** montre les interférences qui se produisent lorsque deux condensats de Bose-Einstein, initialement contenus dans deux pièges voisins, entre en expansion et se rejoignent : les franges obtenues par W. Ketterle démontrent la capacité des ondes de matière à interférer, tout comme les ondes lumineuses.



**28/** Carte de densité d'un nuage d'atomes de rubidium ultra-froids. Lorsque la température est supérieure à la température de transition (à gauche), les atomes forment un nuage très large. Le condensat apparaît lorsque la température passe en dessous de la température de transition : un pic de densité se forme, de nombreux atomes de vitesse très faible se rassemblent au centre du nuage. Une fois le nuage assez froid, presque tous les atomes se retrouvent « condensés » dans l'état d'énergie minimum (à droite).

**29/** Interférences produites à partir de deux condensats de Bose-Einstein.



S O M M A I R E

<b>Introduction</b> .....	2
<b>La lumière</b> .....	2
Le L.A.S.E.R. (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) .....	3
La fibre optique : guide de lumière.....	6
<b>La matière</b> .....	8
La matière dans tous ses états .....	9
Utiliser la matière : la saga des supraconducteurs ....	11
Voir les atomes .....	12
Manipuler les atomes : à la conquête du nanomonde...	13
<b>Les jeux de la lumière et de la matière</b> .....	15
Quand la matière contrôle la lumière : des ailes de papillon aux cristaux photoniques .....	15
Quand la lumière contrôle la matière : les atomes ultra-froids et les condensats de Bose-Einstein .....	16



# Au service de l'éducation

▶▶▶ Le SCÉRÉN s'engage dans

## l'année mondiale de la physique

### ▶▶▶ La révolution Einstein, 1905-2005

100 ans plus tard, retour sur les textes fondateurs qui ont bouleversé notre perception de l'univers.  
Revue *Textes et documents pour la classe*,  
n° 886 décembre 2004, 4 €  
Abonnement : 03 44 03 32 37

### ▶▶▶ 1905, les trois percées d'Albert Einstein

Une approche historique des travaux fondateurs d'Einstein, donnant à l'activité scientifique toute sa dimension humaine.  
Dossier en ligne sur [www.sceren.fr](http://www.sceren.fr), rubrique Thém@doc

### ▶▶▶ Physique-chimie : programmes, accompagnement et autres ressources

Compilation de textes officiels, documents, vidéos et animations, ce cédérom facilite le travail des enseignants et futurs enseignants.  
49 € licence établissement, 15 € licence monoposte

Consultez, commandez sur [www.sceren.fr](http://www.sceren.fr)  
dans les librairies des CRDP et CDDP  
à la librairie de l'éducation, 13 rue du Four 75006 Paris

SCÉRÉN

SERVICES CULTURE ÉDITIONS  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE  
[CNDP - CRDP]

## La physique pour mieux comprendre le monde

L'année 2005 a été déclarée « Année mondiale de la physique » par l'UNESCO pour célébrer les sciences physiques dans le monde entier, exactement cent ans après la parution des travaux révolutionnaires d'Albert Einstein qui ont ouvert la voie à de nombreux développements de la physique du vingtième siècle. Les transistors, les ordinateurs, les lasers ou l'imagerie médicale sont de purs produits des dernières décennies de recherche fondamentale dans les laboratoires de physique, là où s'élaborent aujourd'hui les matériaux et les technologies de demain. Au-delà de la commémoration d'un grand personnage de la physique du vingtième siècle, l'objectif de cette action est aussi de faire connaître à un public le plus large possible les progrès, l'importance et les enjeux de ce grand domaine de la science qu'est la physique. Aux physiciens de montrer qu'il est possible de s'instruire et de se faire plaisir en apprenant de la physique.

Pour l'occasion, la Société Française de Physique a décidé de publier quatre brochures dont les thèmes sont l'Univers, la Terre et son environnement, la physique et le vivant, la lumière. Vous tenez l'une d'entre elle entre vos mains. Bonne lecture !

Cette brochure a été conçue sous la responsabilité de Bernard Jacquier, professeur à l'Université de Lyon II et Jean Vannimenus, directeur de recherche à l'École Normale Supérieure de Paris. Elle a été réalisée et éditée par EDP Sciences avec le soutien de la Société Française de Physique, du ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du Centre National de Documentation Pédagogique. Elle est aussi disponible au format PDF sur le site de la SFP <http://sfp.in2p3.fr>