

fuse et toute information sur la forme de l'impulsion originelle serait perdue.

Le faisceau laser de couplage, est réglé sur la fréquence correspondant à la transition entre les états 2 et 3. Lorsqu'ils sont dans l'état 1, les atomes ne peuvent l'absorber. Lorsque l'impulsion lumineuse, réglée sur la transition 1-3, arrive sur le nuage, son action conjuguée à celle du laser de couplage place les atomes dans une superposition quantique des états 1 et 2 : dans ces conditions, chaque atome est «simultanément» états dans l'état 1 et dans l'état 2. L'état 1, seul, absorberait la lumière de l'impulsion, et l'état 2 absorberait celle du faisceau de couplage. Dans chaque cas, les atomes se retrouveraient dans l'état 3, puis réémettraient ensuite cette lumière au hasard. Toutefois, lorsque l'on tente de faire subir aux atomes ces deux transitions en même temps, elles s'annulent mutuellement selon un phénomène nommé interférence quantique. Le mélange d'états 1 et 2 superposés est désigné sous le nom «d'état sombre» : les atomes ne peuvent «être éclairés» par aucun des deux faisceaux (ils restent «dans le noir»). Le nuage devient transparent à la lumière de l'impulsion, parce que les atomes qui le constituent, placés dans cet état sombre, ne peuvent l'absorber. L'état superposé sombre est caractérisé par les proportions du mélange des états 1 et 2. Cette proportion dépend, en chaque point du nuage, du rapport des intensités reçues de la part de l'impulsion et du faisceau de couplage. Toutefois, une fois que le système se trouve dans un état sombre, il s'adapte pour rester sombre même lorsque les intensités relatives des deux faisceaux

varient : en un point donné du nuage, lorsque l'intensité reçue de l'impulsion augmente, la proportion d'état 2 dans le «mélange» d'états augmente.

À cause d'une interférence quantique du même genre, l'indice de réfraction du nuage vaut exactement un – comme dans le vide – pour la lumière dont la fréquence correspond très précisément à la transition vers l'état 3. Toutefois, aux fréquences voisines, l'indice de réfraction ne vaut plus exactement un.

Le ralentissement de la lumière

Si l'indice de réfraction vaut un pour la fréquence correspondant à la transition vers l'état 3, notre impulsion, réglée sur cette fréquence, ne devrait-elle pas progresser à la vitesse de la lumière dans le vide ? Non, parce que l'indice de réfraction du nuage varie très rapidement pour des fréquences voisines de cette fréquence fondamentale et qu'une impulsion lumineuse ne contient jamais une seule fréquence, mais un intervalle de fréquences.

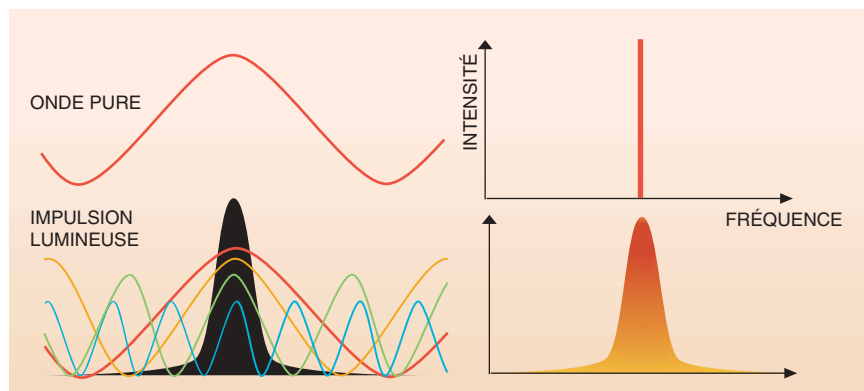
En effet, on peut considérer une impulsion comme une superposition d'oscillations sinusoïdales de fréquences voisines. Le pic d'intensité de l'impulsion correspond à l'endroit où toutes ces oscillations sont en phase, où toutes leurs «crêtes» coïncident (voir la figure 4). La vitesse à laquelle progresse ce point, que l'on nomme «vitesse de groupe», n'est pas toujours égale à la célérité des ondes sinusoïdales – la vitesse de phase – constituant l'impulsion. Dans le vide, la vitesse de phase vaut environ 300 000 kilomètres par seconde, pour toutes les fréquences. Dans ce cas, toutes les ondes sinusoï-

dales constituant l'impulsion avancent à la même vitesse, et le point où elles sont en phase également. L'impulsion progresse alors aussi à la vitesse de la lumière dans le vide, vitesse de phase et vitesse de groupe sont égales. Toutefois, lorsque l'indice de réfraction varie avec la fréquence, les différentes ondes constituant l'impulsion se déplacent à des vitesses légèrement différentes. De ce fait, le déplacement du pic d'intensité de l'impulsion est modifié. En fait la vitesse de groupe, celle à laquelle progresse l'impulsion, diminue d'autant plus vite que l'indice de réfraction varie rapidement avec la fréquence (voir l'encadré page 72).

Cette façon de ralentir la lumière est très différente de ce qui se passe dans un milieu transparent ordinaire d'indice de réfraction supérieur à un. Tout d'abord, la vitesse de groupe est ralentie, mais la vitesse de phase est très peu modifiée, car l'indice de réfraction reste proche de un (dans un milieu transparent ordinaire, la vitesse de groupe diminue parce que toutes les vitesses de phase des ondes sinusoïdales diminuent). Dans notre cas, la vitesse de groupe diminue parce que l'indice varie brusquement sur un intervalle de fréquences étroit (voir la figure 5). Par ailleurs, le milieu ne conserve ces propriétés que si le laser de couplage est allumé.

Lorsque l'on diminue la vitesse d'une impulsion lumineuse d'un facteur égal à 20 millions, on observe plusieurs autres phénomènes. Avant d'entrer dans le condensat, l'impulsion lumineuse est longue de un kilomètre et se propage dans l'air à une vitesse proche de 300 000 kilomètres par seconde (bien sûr, notre laboratoire est loin d'avoir une longueur de un kilomètre, mais si nous placions notre laser à cette distance, ses impulsions auraient effectivement cette taille). Le front avant de l'impulsion traverse le hublot de verre, pénètre dans la chambre à vide, puis dans le condensat d'atomes de sodium en suspension. À l'intérieur de ce minuscule nuage, la lumière se déplace à 54 kilomètres à l'heure (un coureur cycliste pourrait la dépasser).

Puisque le front avant de l'impulsion se déplace très lentement dans le nuage, alors que la partie arrière de l'onde arrive à toute allure, l'impulsion se tasse, telle un accordéon, dans le nuage de sodium. Sa longueur, comprimée d'un facteur 20 millions, n'est plus que de un vingtième de millimètre.



4. UNE IMPULSION LUMINEUSE est formée de plusieurs fréquences, contrairement à une onde sinusoïdale «pure». Le pic de l'impulsion correspond au point où toutes les ondes de fréquences différentes qui la composent sont en phase. Plus l'impulsion est localisée, plus son spectre est large. La vitesse à laquelle se déplace l'impulsion n'est égale à la célérité des ondes sinusoïdales que si elles se déplacent de façon synchrone, c'est-à-dire si l'indice de réfraction ne varie pas avec la fréquence.

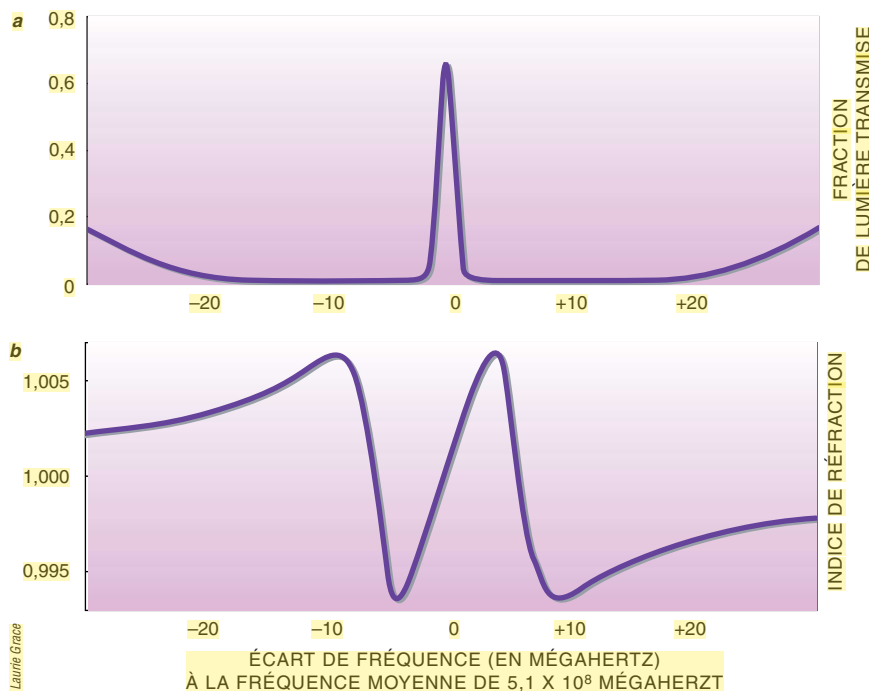
L'impulsion ainsi concentrée ne devrait-elle pas devenir extraordinairement intense ? Il n'en est rien : l'intensité lumineuse reste constante. Plus précisément, dans le vide, l'impulsion contient 50 000 photons ; dans le nuage, elle ne contient plus sous forme d'énergie lumineuse, que l'équivalent de un quatre centième de photon (encore le facteur 20 millions). Qu'est-il arrivé à l'énergie des autres photons ? Une part de cette énergie a été dissipée dans le nuage et cédée aux atomes de sodium, mais l'essentiel a été transféré au faisceau de couplage. Nous avons surveillé l'intensité du laser de couplage et nous avons observé ce transfert d'énergie.

L'empreinte de la lumière

À quoi ressemble l'impulsion lumineuse lorsqu'elle progresse dans le nuage ? Les transferts d'énergie entre les deux faisceaux lumineux modifient les états des atomes de sodium situés sur le passage de l'impulsion. Au niveau du front avant, les atomes passent de leur état originel – l'état 1 – à une superposition d'états 1 et 2 (l'état sombre). Dans la partie centrale de l'impulsion (la plus intense), la proportion d'états 2 contenue dans le « mélange » d'états est maximale. Après le passage de l'impulsion, les atomes reviennent dans l'état 1. Comme ces états correspondent à différents alignements des spins des atomes, c'est-à-dire à différentes polarisations, à chaque mélange d'états de proportion donnée correspond une polarisation particulière des atomes de sodium. Ainsi, l'impulsion de lumière lente, comprimée dans le nuage apparaît accompagnée d'une « onde de polarisation » qui se propage dans le gaz. En fait, l'onde de polarisation et l'impulsion lumineuse se déplacent dans le condensat comme une seule et même entité nommée polariton.

Lorsque le polariton atteint l'extrémité du nuage de gaz, l'impulsion lumineuse se libère dans l'air et retrouve à la fois sa vitesse usuelle de 300 000 kilomètres par seconde, sa longueur initiale de un kilomètre et son énergie, qu'elle récupère dans le laser de couplage.

La vitesse de la lumière obtenue dans ces expériences dépend de plusieurs paramètres. Si certains sont fixés lorsque l'on a choisi l'espèce atomique et les états d'excitation utilisés, deux variables restent ajustables : la densité du nuage atomique et l'intensité du fais-



5. LES PROPRIÉTÉS OPTIQUES INDUITES dans le nuage de sodium par l'action conjuguée du laser de couplage et de l'impulsion ralentie permettent d'obtenir des facteurs de ralentissement de la lumière notables. Le nuage est rendu transparent pour la lumière d'une fréquence précise (a) et son indice de réfraction varie brusquement sur un court intervalle de fréquence (b). La transparence permet le passage sans absorption de l'impulsion lumineuse et sa vitesse est d'autant plus faible que la variation d'indice est brutale.

ceau laser de couplage. L'accroissement de la densité du nuage diminue la vitesse de la lumière, mais, dans les nuages très denses, les atomes sont plus difficiles à confiner dans un champ magnétique et s'échappent rapidement du piège. On peut également réduire la vitesse de l'impulsion en atténuant l'intensité du faisceau de couplage. Toutefois, là encore, le procédé est limité par le fait que si ce faisceau est trop faible, on perd l'effet de transparence électromagnétique induite ; le nuage devient opaque et absorbe l'impulsion.

On peut cependant obtenir le ralentissement ultime, l'arrêt total de la lumière, sans perdre l'impulsion par absorption : on éteint le faisceau de couplage pendant que l'impulsion, ralentie et comprimée, se trouve toute entière dans le condensat, au cœur du nuage. L'impulsion lumineuse s'arrête et ne contient plus d'énergie lumineuse. Le polariton laisse sur les orientations des atomes du gaz froid une empreinte stationnaire qui constitue une sorte d'enregistrement de l'impulsion. Le polariton n'est pas déformé au cours de l'opération car, contrairement à l'impulsion lorsqu'elle pénètre dans le gaz, il ralentit d'un seul bloc. L'empreinte laissée sur les atomes contient toute l'information nécessaire pour reconstituer l'impulsion lumi-

neuse originelle. Ainsi, par exemple, l'intensité de l'impulsion en chaque point est donnée par les proportions des états 1 et 2. En somme, c'est un hologramme de l'impulsion qui se trouve imprimé dans le condensat.

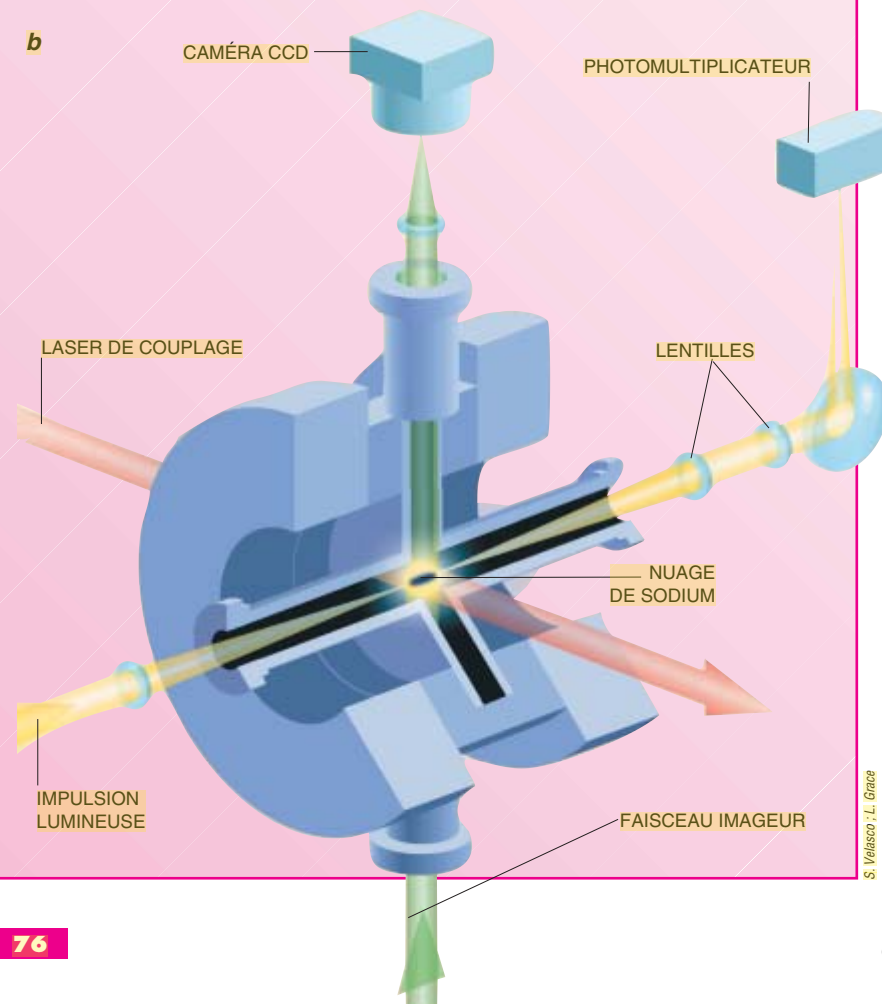
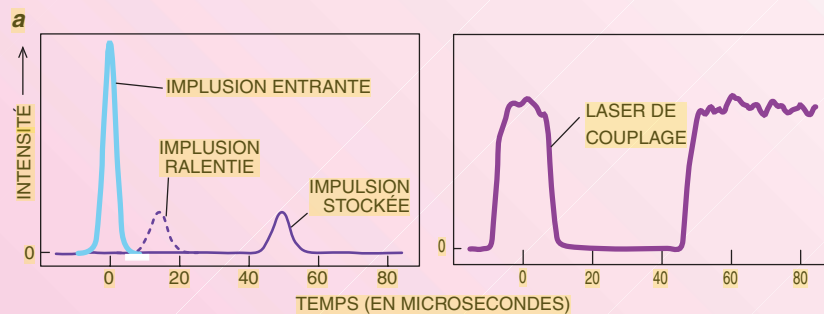
Lorsqu'on l'éclaire à nouveau le condensat avec le laser de couplage, l'impulsion lumineuse réapparaît et se propage à nouveau comme si rien ne l'avait interrompue. Toutefois, on ne peut stocker la lumière que durant une milliseconde tout au plus (si elle n'avait pas été piégée, elle aurait parcouru pendant ce temps 300 kilomètres dans l'air). Plus l'impulsion reste stockée longtemps, plus elle se dégrade : les atomes du gaz restent, même dans le condensat, animés de mouvements erratiques, qui finissent par brouiller la configuration de polarisation. En outre, les collisions entre atomes peuvent dégrader les états de superposition. Au bout d'une milliseconde, l'impulsion de sortie est bien plus faible que l'impulsion originelle, mais nous avons trouvé un moyen d'y remédier. Si, lorsque l'on rallume le faisceau de couplage, on lui confère une intensité supérieure, l'impulsion de sortie est plus brillante, mais plus courte. Si l'on active et désactive rapidement le faisceau de couplage à plusieurs reprises, on régénère l'impulsion en plusieurs « morceaux ». De

Stopper la lumière

L'expérience de ralentissement de la lumière repose sur trois faisceaux laser et un nuage d'atomes de sodium ultrafroids (exagérément grossi sur le schéma) enfermé dans une enceinte où règne un vide intense. Le faisceau de couplage interagit avec le nuage et le rend transparent à la lumière du laser qui produit les impulsions. Rendu transparent, ce nuage ne laisse progresser la lumière que très lentement.

Un tube photomultiplicateur mesure le temps d'arrivée de l'impulsion. Le faisceau d'imagerie mesure alors la longueur du nuage en projetant son ombre sur une caméra. Plusieurs éléments ne sont pas représentés sur le schéma : le dispositif de création et de refroidissement d'un nouveau nuage pour chaque impulsion ; les électroaimants dont les champs combinés maintiennent les atomes en place et certains dispositifs optiques annexes.

On observe le ralentissement des impulsions lumineuses en comparant de façon très précise les instants où elles sont détectées. L'instant où l'on détecte l'impulsion en l'absence de condensat correspond à l'instant zéro. Le ralentissement des impulsions par la présence du condensat est mis en évidence par le retard avec lequel elles atteignent le détecteur (*en pointillés sur la courbe de gauche*). Pour stopper complètement une impulsion, on éteint le faisceau de couplage au moment où elle se trouve à l'intérieur du nuage. Le temps d'arrêt de l'impulsion – environ 35 microsecondes – s'ajoute à son retard. Une impulsion ralentie sort du dispositif avec une intensité diminuée car le nuage n'est pas parfaitement transparent. En outre, une impulsion stoppée se dégrade petit à petit sous l'action de diffusions et de collisions parmi les atomes qui la retiennent.



telles manipulations donnent une idée de la précision avec laquelle on contrôle les impulsions stockées.

Trous noirs et ordinateurs

Le ralentissement et l'arrêt de la lumière ouvrent la voie à de nombreuses expériences intéressantes. On pourrait, par exemple, injecter, dans un condensat de Bose-Einstein, une impulsion lumineuse dont la vitesse égalerait celle du son dans ce condensat (environ un centimètre par seconde). Dans ces conditions, une onde sonore comparable au « bang » des avions accompagnerait l'impulsion et le condensat tout entier se mettrait à osciller. Ce serait une façon nouvelle d'étudier les propriétés superfluides des condensats (certains liquides sont superfluides à très basse température, c'est-à-dire que leur viscosité s'annule, de la même façon que la résistance s'annule dans les métaux très froids).

Aujourd'hui, on sait également créer des vortex (des tourbillons) dans un condensat en rotation. Une impulsion de lumière lente traversant un tel vortex serait entraînée par le mouvement du gaz, un peu à la façon dont les rayons lumineux sont déviés au voisinage des astres massifs ou des trous noirs en rotation. Grâce à la lumière lente, on pourrait simuler ces phénomènes en laboratoire.

La lumière lente annonce également une nouvelle forme d'optique non linéaire fondée sur l'interaction de deux faisceaux laser. Beaucoup de phénomènes d'optique non linéaire sont produits lorsque l'indice de réfraction du milieu considéré varie avec l'intensité de la lumière reçue. Cela ouvre un vaste champ de recherches, tant fondamental qu'appliqué à des domaines aussi variés que l'imagerie ou les télécommunications. L'obtention de certains phénomènes d'optique non linéaire exige aujourd'hui des faisceaux extrêmement intenses, mais, grâce à la lumière ralentie, on pourra les produire avec un très petit nombre de photons. Ces phénomènes devraient être utiles pour la construction d'aiguillages ultrasensibles destinés aux futurs réseaux Internet entièrement optiques.

La lumière ralentie et piégée pourrait également être utilisée pour la construction d'ordinateurs quantiques. Les ordinateurs quantiques seraient des calculateurs où les bits habituels de l'informatique, qui valent soit 0 soit 1,

seraient remplacés par des qubits (pour *quantum bits*), des superpositions de 1 et de 0. Un système de n qubits explorerait «simultanément» 2^n états différents et serait utilisé pour réaliser un très grand nombre d'opérations en parallèle. Ces ordinateurs, s'ils sont un jour opérationnels, résoudront en peu de temps des problèmes mathématiques qui nécessiteraient des durées de calcul considérables sur les ordinateurs ordinaires. Dans les systèmes que l'on envisage aujourd'hui, il existe deux grandes familles de qubits. Les premiers sont fixes dans l'espace : ce sont par exemple des groupes d'atomes dont les spins nucléaires pointent dans différentes directions et qui interagissent rapidement les uns avec les autres. Les seconds se déplacent rapidement d'un endroit à un autre (ce sont, par exemple des photons), mais sont difficiles à faire interagir selon les modes exigés par un ordinateur quantique. En transformant des photons mobiles en polaritons stationnaires – et inversement –, les dispositifs à lumière piégée fourniraient un moyen fiable d'opérer une conversion mutuelle entre ces deux types de qubits. On pourrait, par exemple, imprimer deux impulsions au sein d'un même nuage d'atomes ; cette impression déclencherait l'interaction de polaritons, c'est-à-dire, d'un point de vue informatique, le traitement de l'information contenue dans les impulsions d'entrée. La lecture du résultat s'obtiendrait en transformant l'empreinte laissée par les polaritons en de nouvelles impulsions lumineuses de sortie.

Même si la lumière ralentie n'est pas le moyen le plus pratique ni le plus universel pour la construction de l'ordinateur quantique, elle aura ouvert de nouvelles voies de recherches.

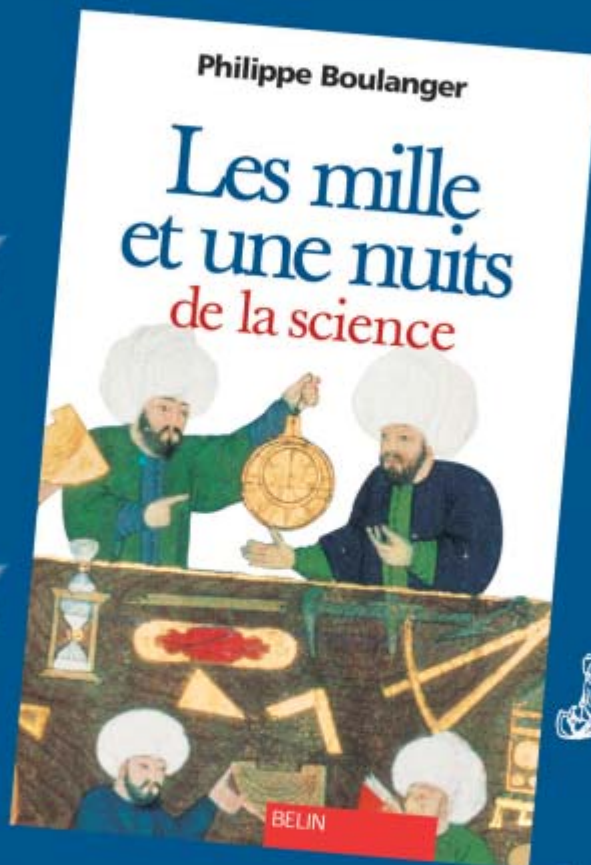
Lene Versteergaard HAU, professeur de physique à l'Université de Harvard, dirige le groupe Atomes refroidis de l'Institut Rowland pour les sciences de Cambridge, dans le Massachusetts.

Stephen E. HARRIS, *Electromagnetically induced Transparency*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 7, pp. 36-42, juillet 1997.

Eric A. CORNELL et Carl E. WIEMAN, *La condensation de Bose-Einstein*, in *Pour la Science*, n° 247, mai 1998.

Chien LIU, Zachary DUTTON, Cyrus H. BEHROOZI et Lene Versteergaard HAU, *Observation of Coherent Optical Information Storage in an Atomic Medium Using Halted Light Pulses*, in *Nature*, vol. 409, pp. 490-493, 25 janvier 2001.

**Entrez dans l'ambiance orientale
des mille et une nuits et laissez-vous
charmer par l'imagination
de Shéhérazade contant la science
et les tribulations des savants**



«Dans ce livre, Philippe Boulanger, Directeur de la revue Pour la Science, réussit le tour de force de vulgariser des concepts difficiles en charmant son lecteur par une subtile danse... des neurones».

Hervé Ponchelet
Le Point

Code 002445 • 240 pages • Prix 100 F
Voir bon de commande p. 96



BELIN • POUR LA SCIENCE