

de leurs enfants se sont établis. C'est le phénomène des pionniers accapareurs, qui met en application la maxime «premiers arrivés, premiers servis». En marge de ces familles figure une population flottante, celle des migrants, dont les enfants sont moins nombreux à s'établir dans la région que ceux de la vieille souche. Comme l'a montré G. Bouchard, ce phénomène est lié au mode d'occupation du sol sur le front pionnier, où la terre doit être défrichée par la mise en place de vastes réseaux de solidarité, traditionnellement tissés par les liens de parenté et de voisinage, et dont les migrants sont exclus.

Ainsi, la transmission des comportements reproductifs est un phénomène de nature sociale. Des individus très fertiles peuvent transmettre cette disposition à leurs enfants. Cependant, si certains gènes mutés se sont autant répandus au Saguenay, ce n'est pas parce qu'ils étaient avantageux, mais parce qu'ils se sont transmis de génération en génération au sein des familles les plus anciennes de la région, qui n'ont cessé de s'agrandir.

Et les autres populations ?

Nous supposons que le modèle de la transmission des comportements reproductifs s'applique à d'autres populations fondatrices comme celles des colonies anglaises, espagnoles ou portugaises d'Amérique. Ces populations ont longtemps disposé de grands espaces en friche, ce qui a probablement favorisé l'enracinement à long terme de certaines familles. Le phénomène semble même encore plus général : il a été observé dans une vieille population d'Europe, celle de la Valserine. Dans cette vallée du Haut-Jura, la fréquence de porteurs de la maladie de Rendu-Osler (une maladie rare, qui se manifeste dès l'enfance par des saignements de nez à répétition et par des lésions

de la peau et des muqueuses) est très élevée. L'analyse démographique menée par E. Heyer révèle que la population se compose d'un noyau d'autochtones, entouré des migrants ou des étrangers installés depuis peu dans la population. Ces derniers y ont une descendance réduite, car la majorité de leurs enfants émigrent. Là encore, les causes sont sociales : le nombre de terres étant limité, seuls les autochtones disposent d'un espace cultivable qu'ils transmettent à leurs enfants.

Si la transmission sociale des comportements reproductifs est une caractéristique générale des groupes humains, il faudra réviser bien des modèles de génétique des populations, car cette transmission provoque une réduction importante de la diversité génétique. Ainsi, les études démographiques québécoises mettent en évidence ce phénomène, que l'on ne peut observer dans la majorité des populations humaines. Cependant, l'utilisation des données démographiques du Québec n'a pas qu'un intérêt théorique : elle a aussi un intérêt médical.

Grâce aux développements récents de la génétique, on peut aujourd'hui prévoir l'apparition de certaines maladies avant même qu'elles ne se manifestent. C'est là l'objet de la médecine génétique, fondée sur le pronostic plutôt que sur le diagnostic ou sur le traitement des maladies. Dans ce domaine, la connaissance de l'histoire démographique constitue un atout majeur. Comme nous l'avons montré, elle rend compte de la répartition de diverses maladies héréditaires dans certaines populations, et peut ainsi contribuer à évaluer les risques à l'échelle régionale. Au Québec, on peut espérer qu'elle facilitera un jour la mise en place de stratégies de prévention efficaces, dans le respect de la dignité humaine et des droits fondamentaux du citoyen.

Alain GAGNON, démographe de l'Université de Montréal, est chercheur au Laboratoire d'anthropologie biologique du musée de l'Homme. Hélène VÉZINA est professeur et chercheur en démographie génétique à l'Université du Québec, à Chicoutimi. Bernard BRAIS est neurogénétiicien au Centre hospitalier de l'Université de Montréal.

Hubert CHARBONNEAU et al., *Naissance d'une population, les Français établis au Canada au XVII^e siècle*, Institut national d'études

démographiques, Presses Universitaires de France et Presses de l'Université de Montréal, Paris et Montréal, 1987.

Gérard BOUCHARD et Marc de BRAEKELEER, *Histoire d'un génome. Population et génétique dans l'Est du Québec*, Presses de l'Université du Québec, Québec, 1991.

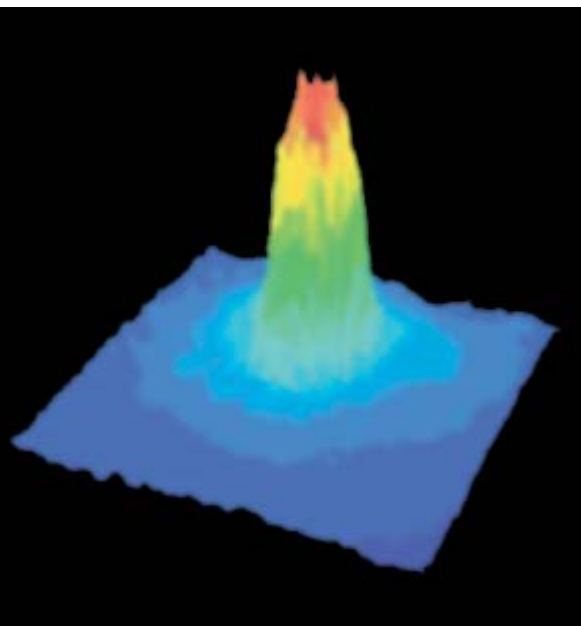
Hélène VÉZINA et al., *Genealogical Study of Alzheimer Disease in the Saguenay Region of Quebec*, in *Genetic Epidemiology*, n° 16, pp. 412-425, 1999.

La lumière ralentie

LENE VERSTERGAARD HAU

Des expériences où la lumière est ralentie, voire même arrêtée, ouvrent la voie, notamment, à de nouvelles méthodes de communication optique et à la simulation de trous noirs en laboratoire.

En juillet 1998, dans un avion qui me transportait de Cambridge à Copenhague, je m'émerveillais de voyager plus vite que la lumière : depuis cinq mois, à l'Institut Rowland de Cambridge, nous parvenions à ralentir des impulsions lumineuses au-dessous de la vitesse d'un long-courrier. Un mois plus tard, nous avions atteint 60 kilomètres par heure... Vers la fin de l'année dernière, nous réussissions à bloquer totalement des impulsions lumineuses à l'intérieur de minuscules nuages de gaz, refroidis au voisinage du zéro absolu, avant de les «relâcher».



1. UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN se forme à très basse température, lorsque certains atomes se condensent en un état quantique unique et évoluent de conserve (le pic central indique qu'ici un très grand nombre d'atomes se sont rassemblés pour former un condensat). Cette image représente l'absorption de la lumière par un nuage de sodium refroidi à une température inférieure à 500 milliardièmes de degrés au-dessus du zéro absolu.

Tout lycéen sait que la vitesse de la lumière est l'une des plus inébranlables caractéristiques de l'Univers. Pourtant, dans nos expériences, elle diminue ! À l'Institut Rowland, les premières expériences de ralentissement de la lumière réalisées par notre équipe duraient en moyenne 27 heures. Pour ce faire, on fait voyager la lumière au sein d'un milieu constitué d'atomes très froids. Lorsque la température devient suffisamment basse, ces atomes forment un condensat de Bose-Einstein, un système remarquable, au sein duquel les atomes sont regroupés en un état quantique unique et où ils évoluent de conserve. Un rayonnement laser dont la fréquence est ajustée contribue à placer l'ensemble des atomes du condensat dans un état qui les rend incapables d'absorber la lumière d'une fréquence donnée : pour une impulsion émise à cette fréquence, le nuage devient transparent, et l'impulsion y progresse très lentement.

Outre son intérêt en physique fondamentale, le ralentissement et l'arrêt de la lumière sont susceptibles d'avoir plusieurs applications. Ainsi, on pourra utiliser de nouvelles méthodes pour sonder les condensats de Bose-Einstein. Par ailleurs, de nouvelles perspectives seront ouvertes dans les domaines des communications optiques, du stockage des données et du traitement quantique de l'information, avec, en ligne de mire, les ordinateurs quantiques qui surpasseront les performances des ordinateurs classiques.

De nombreux matériaux ordinaires ralentissent la lumière. Un rayon lumineux voyage dans l'eau, par exemple, à une vitesse inférieure d'un quart à celle de la lumière dans le vide. Toutefois, le ralentissement de la lumière dans un matériau transparent ordinaire est limité.

La transparence induite

On nomme indice de réfraction le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide et de sa vitesse dans un milieu transparent donné. Le diamant, matériau dont l'indice de réfraction est l'un des plus élevés, ne ralentit la lumière que d'un facteur 2,4. Pour obtenir des facteurs de ralentissement de l'ordre de dix millions, on doit recourir à un effet d'origine quantique que l'on nomme la transparence électromagnétique induite, un phénomène observé pour la première fois au début des années 1990, par l'équipe de Stephen Harris, de l'Université de Stanford. La transparence induite permet de rendre un nuage de gaz aussi transparent que du verre pour les rayons lumineux d'une fréquence bien précise. Pour ce faire, on le manipule à l'aide d'un faisceau laser dit de couplage dont la fréquence est elle-même très précisément choisie.

Malheureusement, cette manipulation est perturbée par l'agitation thermique des atomes. En effet, lorsqu'un atome se rapproche d'une source de lumière, il «voit» arriver des photons dont la fréquence est augmentée d'un facteur proportionnel à sa vitesse. Si l'atome s'éloigne, les photons lui semblent, au contraire, de plus basse fréquence. Ce phénomène est nommé effet Doppler. De ce fait, à cause de l'agitation thermique, quelle que soit la précision avec laquelle on ajuste la fréquence du laser de couplage ou de l'impulsion lumineuse que l'on veut ralentir, tout se passe comme si le nuage de gaz recevait des faisceaux dont les fréquences sont mal ajustées.

Pour minimiser cette dispersion, nous utilisons des atomes extrêmement froids (qui se déplacent lentement). Quelques équipes avaient déjà obtenu



Chloé Simons

2. LE RALENTISSEMENT DE LA LUMIÈRE repose sur la manipulation d'un nuage de matière initialement opaque (un condensat de Bose-Einstein) rendu transparent à l'aide d'un faisceau laser.

des impulsions de lumière ralentie avant nous, mais elles utilisaient des gaz d'atomes à température ambiante et le ralentissement obtenu était limité.

Nous avons créé les conditions nécessaires à l'obtention de la transparence électromagnétique induite dans un nuage d'atomes de sodium en forme de cigare – d'environ 0,2 millimètre de longueur et 0,05 millimètre de diamètre – piégé dans un champ magnétique et refroidi à moins d'un millionième de degré au-dessus du zéro absolu.

Nous refroidissons nos atomes de sodium à l'aide d'un dispositif combinant des faisceaux lasers, des champs magnétiques et des ondes radio. Le sodium est émis par un four chaud sous la forme d'un intense faisceau d'atomes propulsés à environ 2 600 kilomètres par heure. Ils sont alors heurtés de plein fouet par un faisceau laser qui, en une milliseconde, les ralentit à 160 kilomètres par heure – soit une décélération de 70 000 fois l'accélération de la pesanteur, g , produite par un faisceau laser qui ne brûlerait même pas les

doigts. La poursuite du refroidissement s'opère à l'intérieur d'une «mélasse optique», au moyen de six faisceaux qui baignent les atomes de tous côtés, et ralentissent encore les atomes au point des les amener à 50 millionnièmes de degré au-dessus du zéro absolu. En quelques secondes, 10 milliards d'atomes s'accumulent ainsi dans la mélasse optique. Nous éteignons alors les faisceaux laser, plongeant le laboratoire dans une obscurité totale, puis nous établissons des électroaimants dont le champ piège le nuage atomique. Durant 38 secondes, nous refroidissons les atomes par évaporation, éjectant les plus rapides d'entre eux pour ne garder que les plus lents, c'est-à-dire les plus froids. Des ondes radio minutieusement ajustées accélèrent l'éjection des atomes rapides. Tout ce phénomène – de la production du faisceau chaud jusqu'au confinement des atomes froids – se déroule à l'intérieur d'une chambre à vide où règne une pression 10^{14} fois inférieure à la pression atmosphérique (10 millionnièmes de milliards d'atmosphère).

Une fois notre nuage refroidi à environ 500 milliardièmes de degré, il forme un condensat de Bose-Einstein, où les quelques millions d'atomes restant après l'évaporation se comportent de façon totalement synchrone. Le milieu le plus froid de l'Univers se trouve alors suspendu par des champs magnétiques au centre d'une chambre à vide.

Le reste de notre dispositif expérimental, à un centimètre du nuage, est à la température ambiante. Des hublots hermétiques, sur les parois de la chambre, nous permettent d'observer les atomes en cours de refroidissement : un nuage atomique froid dans une mélasse optique ressemble à un petit soleil brillant, de cinq millimètres de diamètre.

Une fois notre cigare d'atomes en place, nous l'éclairons latéralement avec le laser de couplage, puis nous émettons une impulsion lumineuse le long son axe. Pour déterminer la vitesse de l'impulsion lumineuse dans le nuage, nous plaçons un détecteur de lumière derrière le nuage d'atomes et nous attendons que l'impulsion émerge pour

Vitesse de phase, vitesse de groupe

Une impulsion lumineuse est une oscillation électromagnétique de courte durée. Par définition la vitesse de phase est la célérité d'un point de cette oscillation. La vitesse de groupe, V_g , est la vitesse à laquelle progresse l'enveloppe tout entière de ce motif oscillant (voir la figure a).

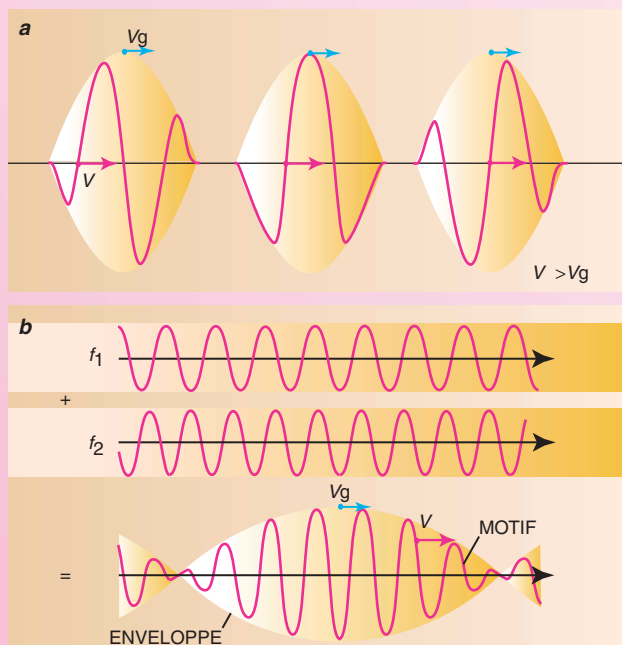
Une impulsion lumineuse n'est jamais composée d'une seule fréquence, mais de la somme d'ondes sinusoïdales. L'intensité maximale de l'impulsion correspond au point où toutes ces ondes sinu-

soïdales sont en phase (où leurs crêtes coïncident). Quand l'indice de réfraction du milieu où se propagent ces ondes ne varie pas avec la fréquence, toutes les composantes «voyagent» à la même vitesse, et le point où elles sont en phase également : la vitesse de groupe et la vitesse de phase sont égales. En revanche, quand l'indice de réfraction du milieu varie avec la fréquence, les composantes de l'impulsion se déplacent alors à des célérités différentes, de sorte que la vitesse de groupe et la vitesse de phase (V_ϕ) sont différentes.

Dans le cas simple de deux ondes sinusoïdales de fréquences f_1 et f_2 , l'onde résultante est une oscillation comprise à l'intérieur d'une enveloppe dont la forme est une sinusoïde de période supérieure (voir la figure b). Cette onde résultante est le produit de deux ondes sinusoïdales que l'on désigne par l'onde «motif» et l'onde «enveloppe».

La fréquence de l'onde «motif» est la moyenne des fréquences f_1 et f_2 . Sa vitesse, qui n'est autre que la vitesse de phase, est donnée par l'indice de réfraction pour cette fréquence moyenne. Quant à l'onde «enveloppe», sa fréquence est proportionnelle à la différence entre f_1 et f_2 . On s'en convainc en se rappelant que si, à la limite, f_1 et f_2 sont égales, l'onde résultante est une sinusoïde «plate» (l'enveloppe est de fréquence nulle). En conséquence, la vitesse de groupe dépend également de l'écart entre les deux indices de réfraction $n(f_1)$ et $n(f_2)$, c'est-à-dire de la variation de l'indice de réfraction avec la fréquence.

Ce raisonnement reste valable lorsque l'on ajoute de nombreuses composantes dont les fréquences sont, cette fois, séparées par des écarts infinitésimaux. La vitesse de phase est donnée par l'indice de réfraction à la fréquence moyenne de l'impulsion, et la vitesse de groupe dépend, de plus, de la variation de l'indice de réfraction. En fait, quand l'indice croît avec la fréquence, la vitesse de groupe est d'autant plus petite que l'indice varie rapidement.

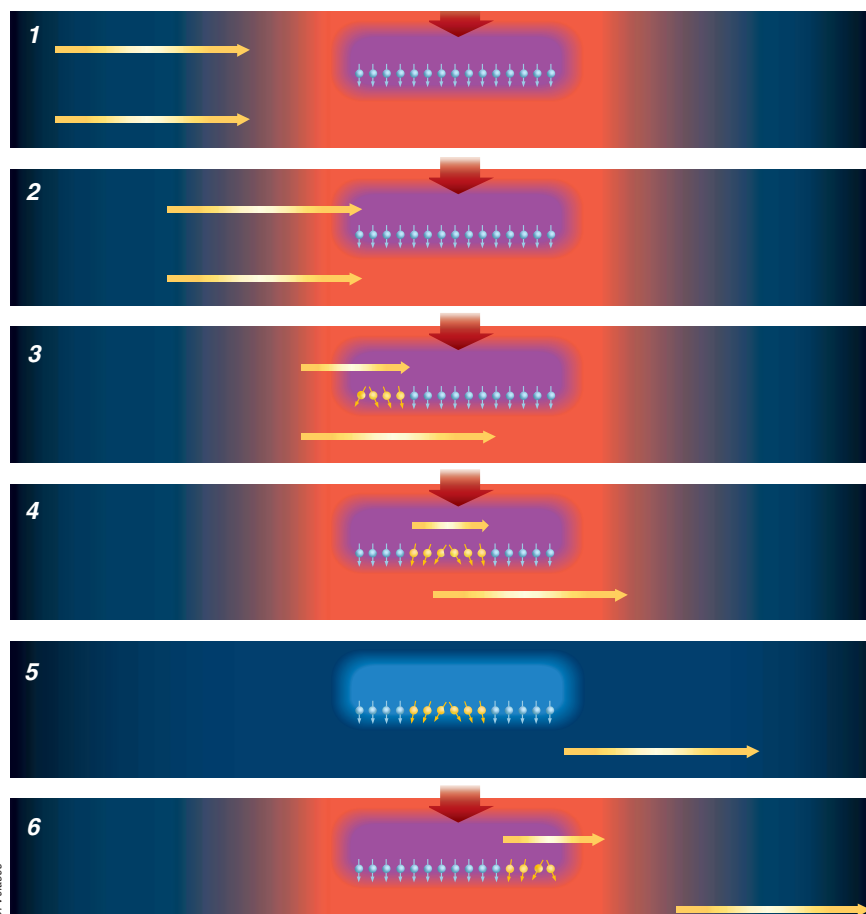


mesurer le temps qu'il lui a fallu pour le traverser. Immédiatement après, nous mesurons la longueur du nuage avec un autre faisceau laser qui l'éclaire par dessous et projette son ombre sur une caméra. Cette longueur divisée par le temps de traversée nous donne la vitesse de l'impulsion. Les durées de traversée obtenus varient de quelques microsecondes à quelques millisecondes. Pour la lumière, cela équivaut à un détour dans un enroulement de plusieurs kilomètres de fibre optique.

Un gaz transparent

Comment le laser de couplage rend-il transparent le condensat d'atomes de sodium ? Il place les atomes du condensat dans un état quantique qui les rend incapables d'absorber la lumière de l'impulsion. Le sodium appartient à la famille des éléments alcalins qui regroupe les atomes n'ayant qu'un seul électron de valence (un seul électron «périphérique»). Cet électron de valence est responsable de la quasi-totalité des interactions du sodium avec son environnement. Lorsque l'électron de valence est sur son orbitale fondamentale, son énergie est minimale. Lorsqu'il quitte cette orbitale, il acquiert d'autant plus d'énergie qu'il s'éloigne du noyau : quand l'électron occupe une orbitale permise de grand rayon, l'atome est dans un état excité. Ces orbitales imposent la façon dont un atome de sodium interagit avec la lumière, c'est-à-dire les longueurs d'onde qu'il absorbe et qu'il émet.

Par ailleurs, l'électron de valence et le noyau de l'atome ont tous les deux un moment magnétique, c'est-à-dire qu'ils se comportent comme de minuscules aiguilles de boussole. De même que le champ magnétique terrestre est associé à sa rotation autour d'un axe Nord-Sud, le magnétisme de l'électron et celui du noyau sont associés à un moment angulaire intrinsèque, ou spin (une grandeur quantique dont l'équivalent, en physique classique, serait la rotation sur elles-mêmes des particules considérées). Lorsque les deux spins – les deux «aiguilles de boussole» – sont parallèles, mais de sens opposé (une configuration dite antiparallèle), l'interaction de leurs champs magnétiques est minimale, elle est maximale lorsqu'ils sont parallèles et de même sens. Par conséquent, outre le rayon de l'orbite occupée par l'électron de valence, l'alignement des spins



3. À L'INTÉRIEUR DU CONDENSAT : avant que l'impulsion n'atteigne le nuage d'atomes (en violet), tous les spins des atomes pointent dans la même direction (petites flèches). Un faisceau laser de couplage (en rouge) rend le nuage transparent à la lumière de même fréquence que l'impulsion (1, 2). Le nuage ralentit l'impulsion et la comprime (3), tandis que l'état des atomes change sur son passage, formant une onde de polarisation qui accompagne l'impulsion. L'ensemble est nommé polariton. Quand l'impulsion est tout entière dans le nuage (4), on éteint le laser de couplage (5). La partie lumineuse de l'impulsion disparaît, mais le polariton laisse dans les atomes une empreinte qui contient toute l'information nécessaire pour la ressusciter. Un peu plus tard (6), le laser de couplage est à nouveau allumé. L'impulsion est régénérée et recommence à se propager.

électronique et nucléaire détermine l'énergie des états excités.

Bien qu'un atome puisse occuper une multitude d'états excités, nous n'en avons utilisé que trois pour ralentir la lumière. Nous les avons nommés états 1, 2, et 3. Après sa préparation, le nuage de sodium ultrafroid contient des atomes qui se trouvent tous dans l'état 1, l'état fondamental, où l'énergie est minimale : l'électron de valence est sur sa plus basse orbitale, son spin est antiparallèle au spin du noyau et, en outre, le magnétisme total de l'atome est parallèle et de sens opposé au champ magnétique que nous utilisons pour maintenir le nuage en place. L'état 2 ressemble beaucoup à l'état 1, mais les spins de l'électron et du noyau sont parallèles et de même sens, ce qui augmente légèrement l'énergie de l'atome (d'environ 0,002 électron-volt). L'état 3 est environ 300 000 fois plus énergé-

tique que l'état 2 et s'obtient en propulsant l'électron de valence sur une orbitale plus éloignée. En retombant de l'état 3 vers l'état 1 ou vers l'état 2, ces atomes émettent une lumière dont la fréquence correspond à la couleur jaune caractéristique des lampes à vapeur de sodium utilisées pour les éclairages publics.

L'impulsion lumineuse que nous voulons ralentir est réglée sur une fréquence correspondant à l'énergie nécessaire pour passer de l'état 1 à l'état 3 (la lumière de cette impulsion est jaune). Si, sans autre précaution, on envoyait une telle impulsion sur le nuage, les atomes l'absorbent totalement et passeraient de l'état 1 à l'état 3. Rapidement, ils se désexciteraient et retomberaient dans l'état 1 en émettant la lumière jaune correspondante, mais ils le feraient au hasard dans le temps et dans l'espace. Le nuage rayonnerait une lueur dif-

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.

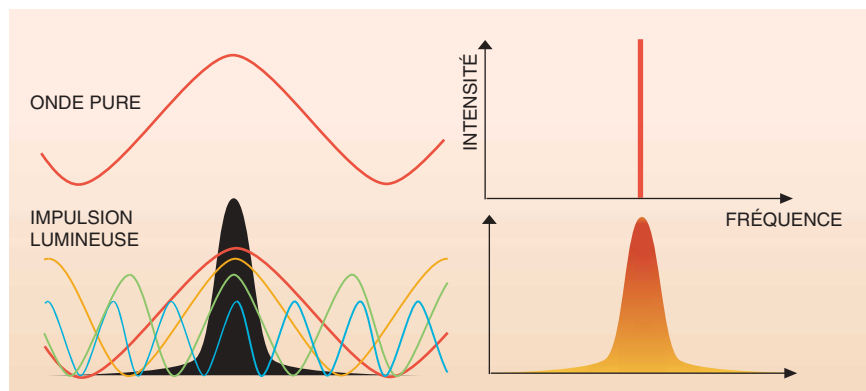
En effet, on peut considérer une impulsion comme une superposition d'oscillations sinusoïdales de fréquences voisines. Le pic d'intensité de l'impulsion correspond à l'endroit où toutes ces oscillations sont en phase, où toutes leurs «crêtes» coïncident (voir la figure 4). La vitesse à laquelle progresse 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 plaçons 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.

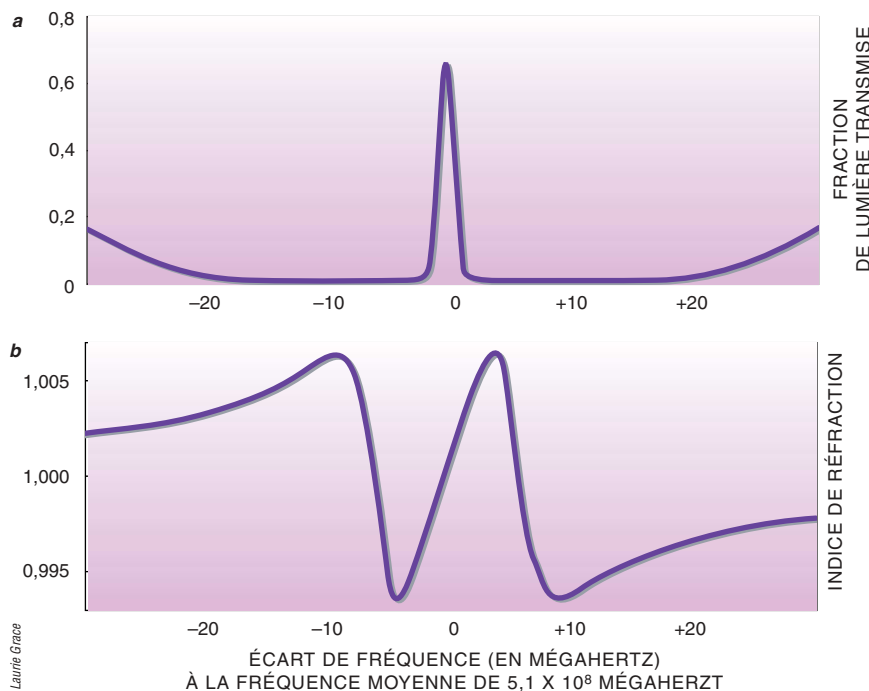
L'impulsion ainsi concentrée ne devrait-elle pas devenir extraordinairement intense ? Il n'en est rien : l'intensité lumineuse reste constante. Plus précisément, dans le vide, l'impulsion contient 50 000 photons ; dans le nuage, elle ne contient plus sous forme d'énergie lumineuse, que l'équivalent de 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.

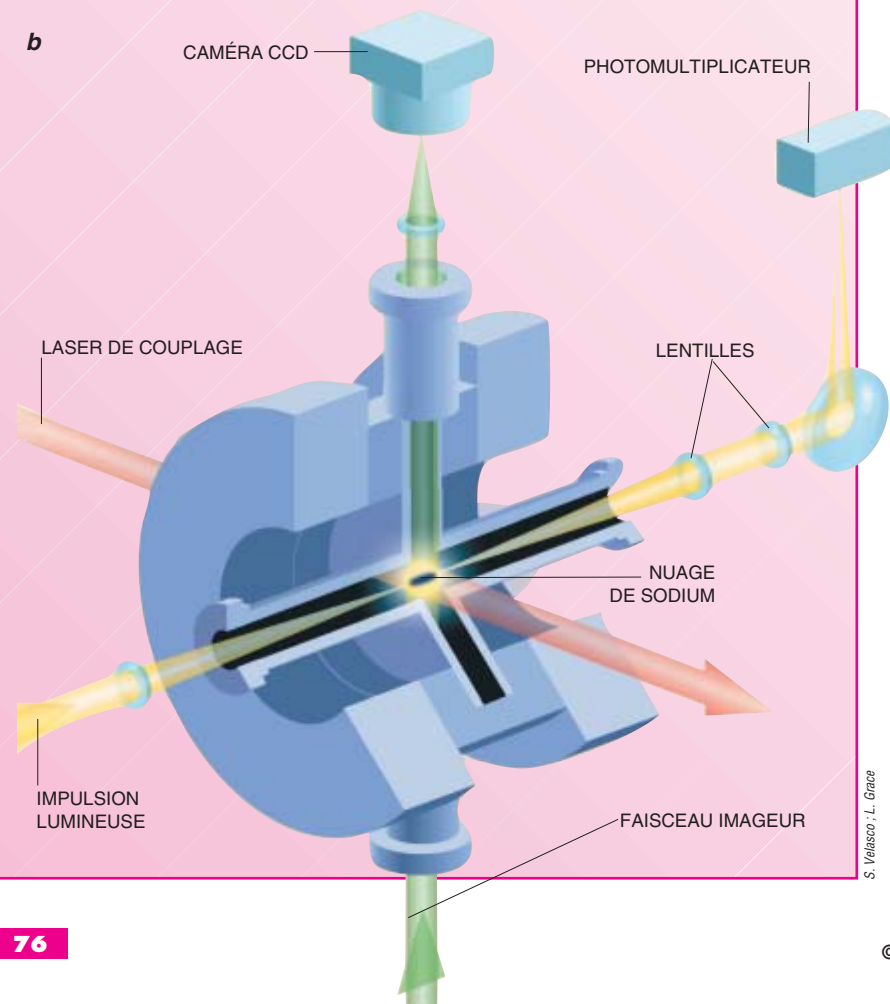
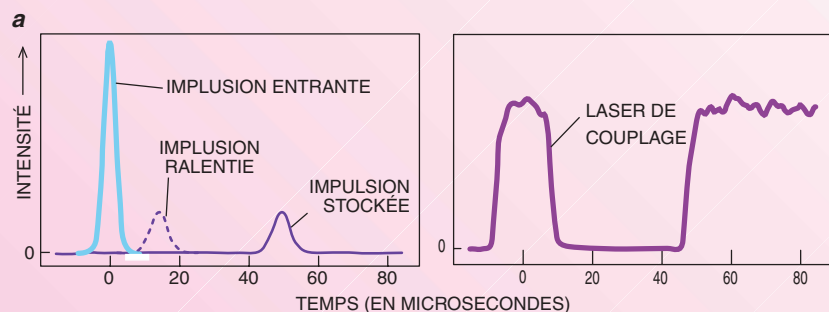
Lorsqu'on l'éclaire à nouveau le condensat avec le laser de couplage, l'impulsion lumineuse réapparaît et se propage à nouveau comme si rien ne l'avait interrompue. Toutefois, on ne peut stocker la lumière que durant une milliseconde tout au plus (si elle n'avait pas été piégée, elle aurait parcouru 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.

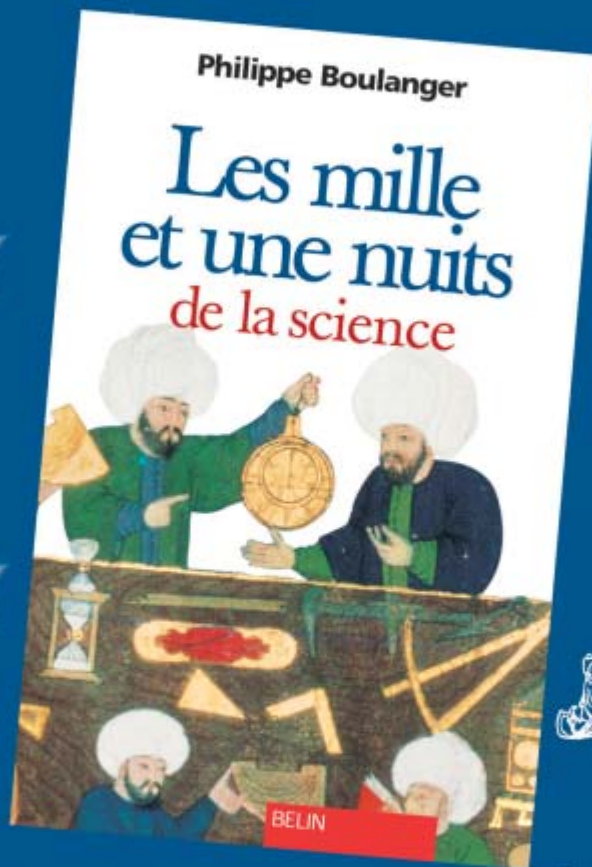
Lene Versteergaard HAU, professeur de physique à l'Université de Harvard, dirige le groupe Atomes refroidis de l'Institut Rowland pour les sciences de Cambridge, dans le Massachusetts.

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

