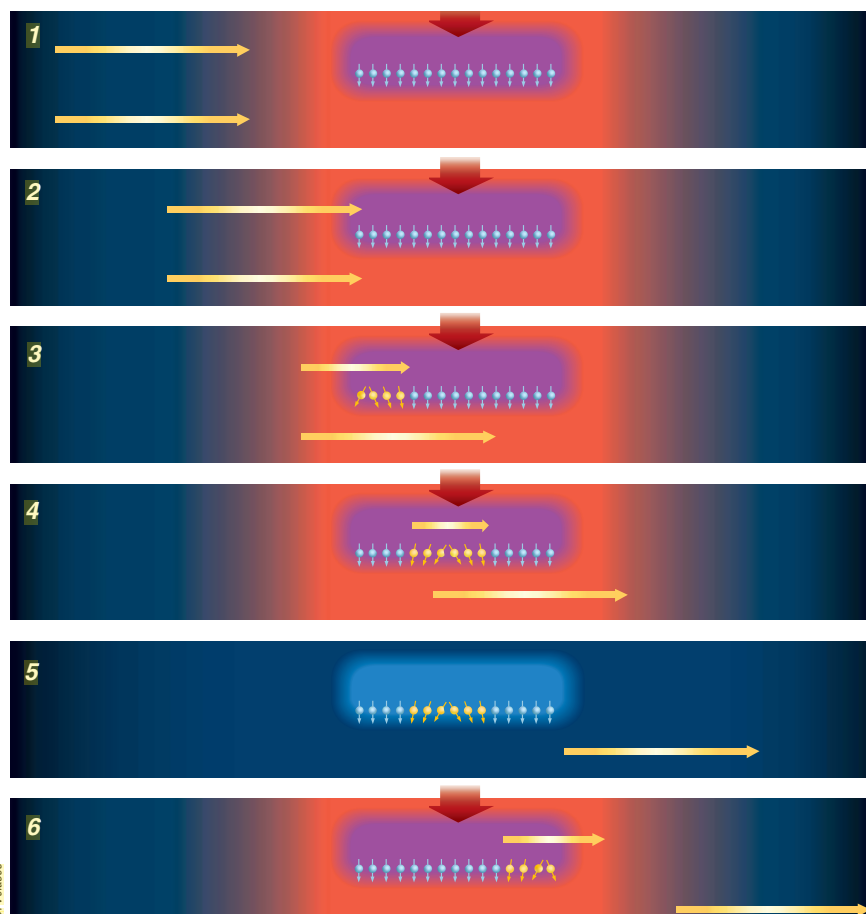


mesurer le temps qu'il lui a fallu pour le traverser. Immédiatement après, nous mesurons la longueur du nuage avec un autre faisceau laser qui l'éclaire par dessous et projette son ombre sur une caméra. Cette longueur divisée par le temps de traversée nous donne la vitesse de l'impulsion. Les durées 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.

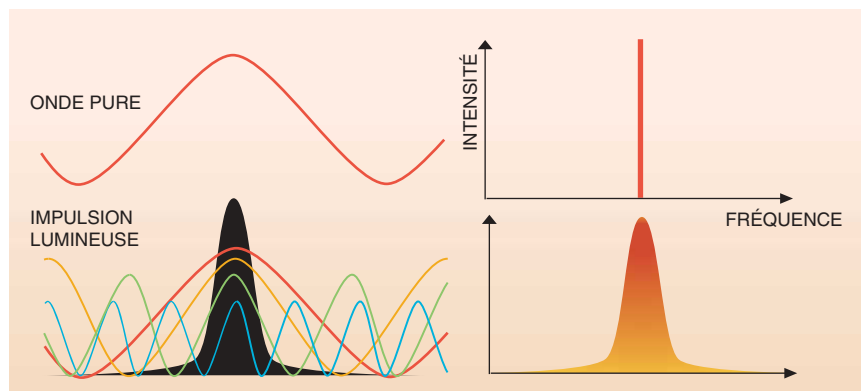
En effet, on peut considérer une impulsion comme une superposition d'oscillations sinusoïdales de fréquences voisines. Le pic d'intensité de l'impulsion correspond à l'endroit où toutes ces oscillations sont en phase, où toutes leurs «crêtes» coïncident (voir la figure 4). La vitesse à laquelle progresse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