■ LE CONTEXTE ■ En 2001, Eric Cornell, Carl Wieman et Wolfgang Ketterle ont reçu le prix Nobel de physique pour la fabrication, six ans plus tôt, d'un nouvel état de la matière : le « condensat de

Bose-Einstein ». Grâce à des techniques perfectionnées de refroidissement des gaz d'atomes, ils avaient forcé tous les atomes à adopter le même comportement, à l'instar des photons dans un

Lelaser à en quête d'un

Chris Westbrook

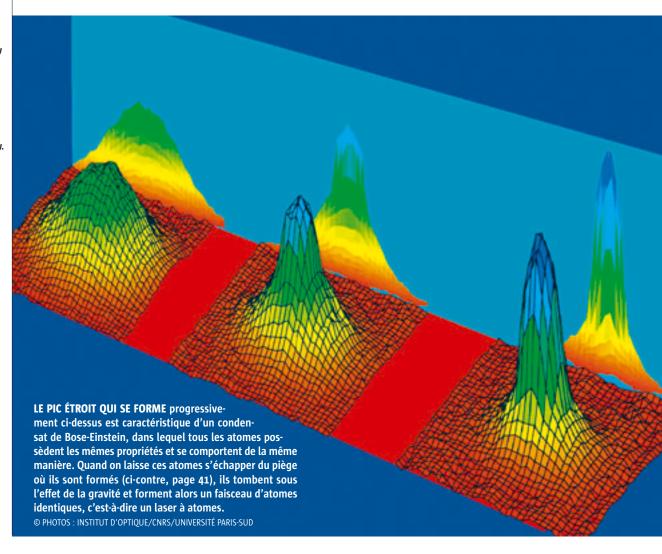
est directeur de recherche au laboratoire Charles-Fabry de l'institut d'optique du CNRS et de l'université Paris-Sud.

Philippe Bouyer

est chargé de recherche au laboratoire Charles-Fabry.

Cécile Michaut,

journaliste scientifique spécialisée en physique et en chimie, est collaboratrice régulière de *La Recherche*.



laser. Les physiciens en ont immédiatement relevé l'intérêt pour plusieurs applications pratiques. Aujourd'hui, plus de 100 équipes travaillent sur ce sujet. En outre, alors que les lasers avaient mis plus de vingt ans à sortir des laboratoires de recherche, les lasers à atomes commencent à intéresser les industriels à peine huit ans après leur découverte.

atomes futur industriel

Dans les années soixante, les physiciens domestiquaient la lumière dans les lasers. Depuis 1995, ils savent également apprivoiser la matière dans les « condensats de Bose-Einstein », dans lesquels il est impossible de distinguer les atomes les uns des autres. En les laissant s'échapper, on crée un laser à atomes. À quand les applications pratiques ?

aisses de supermarché, lecteurs de DVD, imprimantes de bureau, etc. : les lasers sont omniprésents. Les qualités de la lumière laser ont fait son succès. Par exemple, le seul fait que tous les photons émis par un laser soient rigoureusement identiques permet que sa longueur d'onde soit parfaitement définie et que le faisceau reste très fin sur de longues distances.

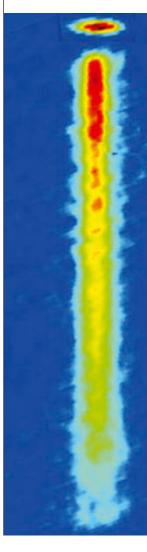
Utiliserons-nous tout aussi naturellement des « lasers à atomes » dans quelques années ? Ces dispositifs, qui émettent des jets d'atomes tous rigoureusement identiques les uns aux autres, existent déjà dans quelques laboratoires de recherche fondamentale. Ils sont toutefois encore rudimentaires. Comme les premiers lasers mis au point dans les années soixante, ils sont volumineux, coûteux et difficiles à maîtriser. Mais avec quelques progrès, et pour peu que des industriels s'y intéressent, les lasers à atomes pourraient,

dans les années à venir, devenir indispensables dans de nombreuses applications.

Comme pour beaucoup de découvertes reposant sur les lois de la mécanique quantique, c'est Einstein qui a élaboré les principes qui sont à la base du laser à atomes. En l'occurrence, il s'est appuyé sur les travaux théoriques du physicien indien Satyendranâth Bose. En 1924, ce dernier lui avait envoyé un article dans lequel il expliquait une propriété du rayonnement lumineux (le « rayonnement du corps noir ») par le comportement statistique étrange des photons. Bose prévoyait que, au lieu de se répartir au hasard comme des billes, les photons avaient tendance à s'agréger. Einstein a étendu ce raisonnement aux atomes. Il a montré que, dans certaines conditions, les atomes d'un gaz peuvent de la même façon se « condenser » et former une seule entité, qui se comporte comme une onde géante.

Dans cette nouvelle phase de la matière, nommée « condensat de Bose-Einstein », les atomes sont tous rigoureusement identiques. Bien entendu, ils correspondent tous au même élément chimique mais, de surcroît, leurs caractéristiques individuelles sont les mêmes : ces atomes se déplacent à la même vitesse et occupent un minuscule espace dans lequel ils se confondent les uns avec les autres. Ils sont absolument indiscernables.

En 1925, le physicien d'origine autrichienne Wolfgang Pauli a montré que cette condensation n'est possible que pour les photons et pour les atomes ayant un nombre pair de particules (protons, neutrons et électrons), qualifiés de « bosons ». Les autres atomes, ainsi que les électrons, sont des « fermions », qui tendent au contraire à s'éviter les uns les autres. Ces derniers peuvent être considérés comme « individualistes », alors que les bosons seraient plutôt =>



* Les alcalins sont une famille d'éléments chimiques aux propriétés semblables situés sur la première colonne du tableau de classification

périodique

de Mendeleïev.

⇒ des moutons de Panurge. Les physiciens Enrico Fermi et Paul Dirac ont établi en 1926 les lois statistiques du comportement de ces fermions.

Dans un condensat de Bose-Einstein, les atomes sont donc dans la même situation que les photons dans un laser : toutes les particules sont identiques et possèdent les mêmes propriétés quantiques. De ce point de vue, un condensat d'où l'on extrait des atomes est donc un laser à atomes (lire « Le condensat qui venait du froid », ci-contre).

Les fondements théoriques du laser à atomes ont ainsi été posés dans la première moitié du XX^e siècle. Mais le passage de la théorie à l'application s'est révélé très long, de la même façon que le laser : le principe fondamental qui permet de fabriquer des photons tous identiques, l'émission stimulée, avait été imaginé dès 1917 mais n'a été mis en œuvre que dans les années soixante. Il avait fallu surmonter de nombreuses difficultés scientifiques, et technologiques, qui ont fait l'objet de deux prix Nobel.

Le pari risqué de l'hélium

Pour le condensat de Bose-Einstein, les difficultés ont été encore bien plus grandes. Premier obstacle : la condensation n'est possible qu'à très basse température, de quelques milliardièmes de kelvin. Il fallait donc apprendre à refroidir suffisamment des atomes. Ce n'est qu'en 1995 qu'Eric Cornell et Carl Wieman, de l'institut JILA (Colorado), ont obtenu un condensat d'environ 2 000 atomes de rubidium, à une température de 20 nanokelvins. Quatre mois après, de façon indépendante, Wolfgang Ketterle, au MIT, en a formé un autre, de plusieurs centaines de milliers d'atomes

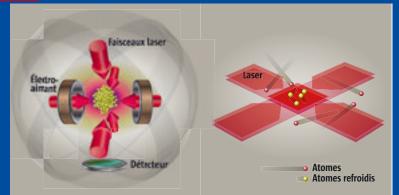
de sodium. Ils ont partagé le prix Nobel de physique en 2001 pour ces réalisations.

Très vite, Wolfgang Ketterle, qui disposait de suffisamment d'atomes dans son condensat, a tenté d'en extraire un faisceau. Il a pour cela manipulé l'aimantation des atomes à l'aide de champs magnétiques oscillants, afin de permettre à une partie d'entre eux de sortir du piège magnétique qu'il utilisait pour les confiner et les refroidir. Ces atomes, en tombant par gravitation, formaient un faisceau qui suffisait à définir un laser à atomes.

Pour notre part, au laboratoire Charles-Fabry, à Orsay, nous nous sommes intéressés aux condensats de Bose-Einstein dès 1995. Cela en compétition vive – mais néanmoins amicale – avec le laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure. Notre choix s'est porté sur le rubidium et l'hélium, car nous possédions déjà des expériences du refroidissement de ces atomes, que l'on peut manipuler avec des lasers conventionnels. Le rubidium, déjà condensé par l'équipe de JILA, nous a permis d'apprendre les techniques de condensation et de mettre au point de nouvelles expériences sur un atome connu. En 1998, nous sommes ainsi arrivés à produire un condensat de rubidium.

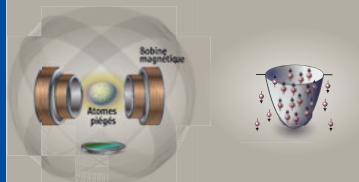
Miser sur l'hélium était en revanche un pari risqué: jusquelà – et c'est encore vrai aujourd'hui –, tous les autres éléments avec lesquels on avait fabriqué des condensats étaient de la famille des alcalins* (hydrogène, lithium, sodium, potassium et rubidium). Or, l'hélium ne fait pas partie de cette famille: c'est un gaz rare. Nous n'étions donc pas du tout certains qu'il se laisserait condenser. En effet, lorsque

Fig.1 Les quatre étapes de production d'un faisceau laser à atomes



1. Refroidissement optique

En présence d'un champ magnétique créé par des bobines, les six lasers exercent une « pression de radiation » sur les atomes pour les refroidir et les pousser vers le centre du piège. À droite, représentation du piège à deux dimensions : les atomes les plus lents (froids) restent piégés ; les plus rapides sont ralentis ou passent au travers du piège.



2. Piégeage magnétique

Un champ magnétique puissant confine les atomes au centre du piège. En effet, chaque atome possède un petit dipôle magnétique. À droite, la représentation de l'énergie des atomes dans le piège : seuls les atomes possédant un dipôle magnétique orienté dans le bon sens sont retenus dans le piège et ralentis, les autres s'échappent.

l'on refroidit les atomes en « évaporant » les plus chauds d'entre eux, il arrive souvent que l'on en perde trop. Toute la difficulté de l'expérience consiste à trouver la bonne allure de refroidissement pour minimiser les déperditions. Mais, pour certains atomes, les pertes sont par nature toujours trop importantes pour obtenir un condensat. On a longtemps cru que c'était le cas pour le césium, sur lequel des équipes ont échoué de nombreuses fois dans le passé, avant de réussir à la fin 2002. Or, nous ne savons pas calculer *a priori* les pertes d'atomes. En cas d'échec, donc, nous ne savons pas si celui-ci est dû à l'expérience - qui dans notre cas n'était pas encore au point – ou s'il est physiquement impossible d'obtenir un condensat avec l'hélium.

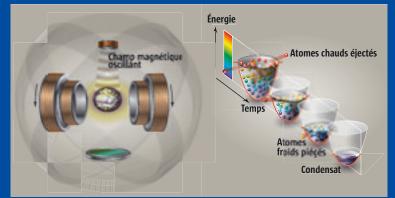
En février 2001, après plusieurs années de recherches intensives pendant lesquelles nous avions construit et testé notre expérience, le résultat est apparu subitement.

Depuis quelques semaines déjà, nous détections quelques atomes refroidis commençant à s'agréger. Mais le signal grossier représentant la densité d'atomes au centre du piège disparaissait aussitôt, et nous ne comprenions pas pourquoi. Un soir, alors que la majorité des membres de l'équipe était déjà partie, Olivier Sirjean, alors en première année de thèse, a décidé de continuer à refroidir les atomes

TECHNIQUE Le condensat qui venait du froid

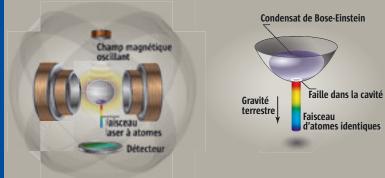
L'OBTENTION D'UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN. PRÉCURSEUR DU LASER À ATOMES, nécessite de refroidir ces derniers à des températures extrêmement basses, de quelques milliardièmes de kelvin [fig. 1]. Refroidir équivaut à ralentir ces atomes le plus possible. Paradoxalement, ce sont les lasers, pourtant capables de brûler fortement la matière, qui ont permis de réaliser des refroidissements très poussés. Dans les années quatrevingt, plusieurs équipes ont développé des techniques de refroidissement fondées sur les lasers, qui formaient un piège optique. Des températures très faibles ont ainsi été atteintes, de quelques microkelvins (10⁻⁶ kelvin, soit quelques millionièmes de degrés au-dessus du zéro absolu). Mais les atomes restaient encore trop chauds. Pour aller plus loin, il faut arrêter des lasers. C'est peut-être pourquoi ce ne sont pas les équipes les plus avancées dans le refroidissement par laser qui ont obtenu les premiers condensats de Bose-Einstein: difficile d'éteindre les lasers qui avaient apporté tant de résultats! Les physiciens ont rajouté un piège magnétique, formé par un champ magnétique inhomogène, nul au centre du dispositif et croissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre, empêchant les atomes de sortir du piège. La dernière étape, dite de refroidissement évaporatif, consiste à laisser s'échapper les atomes les plus chauds, pour refroidir l'ensemble. Exactement comme l'évaporation au-dessus d'une tasse de café refroidit le breuvage. Pour chasser les atomes chauds, on ajoute un champ magnétique oscillant qui tronque le piège à une énergie bien définie. Les atomes les plus chauds (donc les plus rapides) s'échappent ainsi du piège, alors que les plus lents sont rattrapés par le champ attractif avant d'avoir pu être éjectés par le champ répulsif. En diminuant peu à peu la hauteur du piège (en changeant la fréquence du champ oscillant), on permet à des atomes de moins en moins rapides de s'échapper, et seuls les atomes les plus froids restent.

sans chercher à comprendre pourquoi le signal disparaissait. Tout à coup, il a vu un signal plus fin, montrant qu'environ 100 000 atomes étaient dans le même état. Il nous a téléphoné immédiatement. Le temps que nous arrivions, le condensat était là. Une semaine après, le laboratoire Kastler-Brossel parvenait au même résultat [1]. Ce succès n'est pas simplement un condensat de plus \Rightarrow



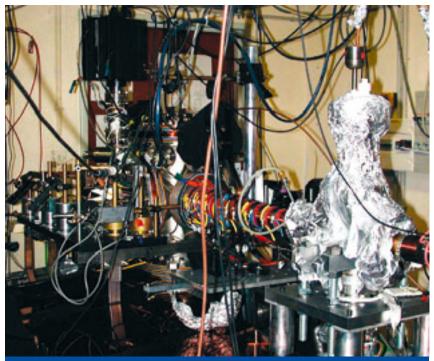
3. Refroidissement évaporatif

Un champ magnétique oscillant (au-dessus des atomes) change l'orientation des dipôles magnétiques aux bords du piège. Les atomes les plus chauds (à droite, en rouge) s'échappent ainsi du piège: ils s'« évaporent ». Les plus froids (en violet) restent piégés. L'énergie moyenne des atomes diminue. La difficulté consiste à refroidir suffisamment les atomes (afin d'obtenir un condensat) sans en perdre trop.



4. Émission des atomes

Le champ magnétique oscillant (au-dessus du condensat) est réglé pour changer l'orientation de quelques dipôles magnétiques et libère les atomes au centre du piège. On obtient ainsi un « trou » dans le piège (à droite). Les atomes ainsi libérés forment le faisceau d'un laser à atomes. Ils sont comptabilisés par le détecteur situé au-dessous du condensat.



LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE FABRICATION D'UN CONDENSAT de Bose-Einstein d'atomes d'hélium.

⇒ dans la gibecière des physiciens! En effet, nous avons utilisé des atomes d'hélium dans un état excité: ils conservent, « cachée » en eux, une énergie considérable, équivalente à une température de quelque 200 000 kelvins. Nous obtenons cet état en bombardant préalablement les atomes d'hélium par des électrons. Bien que ces atomes excités aient une durée de vie finie (d'environ deux heures), ils sont bien plus faciles à manipuler avec des lasers que les atomes d'hélium dans leur état fondamental. En outre, ces atomes excités sont plus faciles à détecter: lorsqu'ils frappent une surface, ils libèrent cette énergie en y arrachant des électrons, ce qui revient à créer un courant électrique, facilement mesurable avec une grande précision. Sans cette technique de détection, la seule manière de distinguer les atomes du laser est de les éclairer avec un fais-

[1] La Recherche, 343, 10, 2001.

PRINCIPE La « couleur » du laser à atomes

UN LASER OPTIQUE ÉMET UNE LUMIÈRE de couleur bien définie: tous les photons possèdent la même longueur d'onde, qui définit la couleur. Quelle est la couleur d'un laser à atomes? La réponse se trouve dans les travaux du physicien français Louis de Broglie, qui a montré au début du XX^e siècle que chaque particule pouvait aussi être considérée comme une onde, dont la longueur est inversement proportionnelle à sa vitesse. Un atome d'hélium d'un condensat, évoluant par exemple à une vitesse de 10 centimètres par seconde, possède ainsi une longueur d'onde de 1 micromètre: sa couleur correspond donc à l'infrarouge. Lorsque les atomes du laser tombent sous l'effet de la pesanteur, leur vitesse augmente et leur « couleur » change, passant du rouge au bleu.

ceau lumineux et d'observer leur ombre (voir photo p. 41). En parallèle avec ce travail sur l'hélium, nous poursuivions notre travail avec le condensat de rubidium. En particulier, nous cherchions à mieux maîtriser l'extraction des atomes. En effet, lors des premières expériences de laser à atomes au MIT, les atomes sortaient par bouffées. Nous avons réussi à mieux contrôler les champs oscillants, et à extraire plus régulièrement les atomes pour obtenir un seul faisceau régulier.

Le défi de la continuité

L'un des principaux aspects de la mise au point de lasers à atomes concerne aujourd'hui la possibilité d'émettre en continu des jets atomiques. Un laser à atomes qui fonctionnerait sans discontinuer constituerait une avancée importante. De la même façon, les premiers lasers optiques n'émettaient que des impulsions brèves, entre lesquelles il fallait « recharger » le laser. Mais il n'avait pas fallu plus de six mois pour concevoir des lasers continus : la création de photons à partir d'énergie électrique ne pose pas de problème. En revanche, dans un laser à atomes, nous ne créons pas ces derniers : ils préexistent, évidemment. Il faut donc en apporter de l'extérieur si nous voulons recharger nos condensats de Bose-Einstein d'où sont extraits les faisceaux. Toute la difficulté est de le faire sans détruire le condensat lui-même.

Pour fabriquer des lasers à atomes utilisables en continu, deux stratégies sont aujourd'hui à l'étude. La première consiste à fabriquer des condensats, puis à les déplacer vers un réservoir d'où les atomes sont extraits en continu. Nous savons en effet fabriquer des « pinces optiques », formées d'un laser exerçant une action mécanique sur les atomes et capables de déplacer les condensats sans les détruire. Notre équipe a entrepris la construction d'un montage expérimental dans ce but.

L'autre stratégie intéressante, étudiée notamment au laboratoire Kastler-Brossel, est de mener de pair la formation du condensat et l'écoulement du laser à atomes. Les chercheurs introduisent des atomes dans un guide, sorte de long tuyau guidant magnétiquement les atomes, et les refroidissent pendant leur traversée selon les méthodes classiques de refroidissement évaporatif (lire « Le condensat qui venait du froid », p. 43). Leur difficulté principale est de charger le guide en continu. Bien entendu, lorsque l'une de ces deux approches (ou les deux) aura réussi, il faudra ensuite augmenter le flux d'atomes, puis miniaturiser ces dispositifs, qui mesurent encore plusieurs mètres de long.

Toutefois, des applications sont d'ores et déjà accessibles aux lasers à atomes pulsés. Ceux-ci sont capables d'émettre des atomes pendant une fraction de seconde avant d'être rechargés en quelques dizaines de secondes. Plusieurs dispositifs fonctionnant déjà grâce aux sources d'atomes froids ont tout à gagner des lasers à atomes. C'est le cas notamment des horloges atomiques, qui permettent de

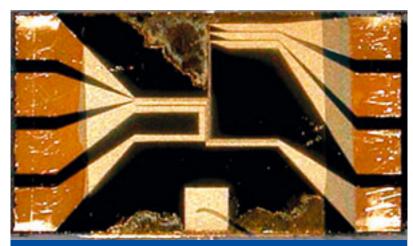
mesurer le temps avec des précisions inégalées et sont utilisées aussi bien en astronomie ou en physique atomique que dans les télécommunications ou le système de repérage GPS. Leur principe : mesurer le plus exactement possible les oscillations naturelles du noyau de césium, qui vibre 9 192 631 770 fois par seconde. Or, le mouvement des atomes de césium perturbe cette mesure. D'où l'intérêt de les refroidir davantage, en formant un condensat de Bose-Einstein. Les progrès seraient alors comparables à ceux qu'ont apportés les lasers optiques par rapport aux faisceaux lumineux traditionnels.

Autre application très prometteuse : les gyromètres, qui sont très utilisés pour la navigation, pour les mesures géologiques ou pour vérifier expérimentalement avec une grande précision des effets prévus par les théories. Un gyromètre mesure une vitesse de rotation en analysant la modification du trajet d'un faisceau lors des changements de direction. Les faisceaux d'atomes sont plus sensibles aux mouvements à cause de leur masse, et sont potentiellement bien plus précis que les faisceaux laser. Déjà, les gyromètres utilisant les atomes froids sont comparables aux meilleurs gyromètres à laser optique. Un projet spatial baptisé Hyper, prévoyant d'installer des gyromètres à atomes froids dans l'espace, est actuellement à l'étude à l'Agence spatiale européenne (ESA). Il servirait à vérifier expérimentalement certains effets prévus par la relativité générale, détectables à proximité d'une masse en rotation comme la Terre. Lorsque les lasers à atomes seront utilisables dans de tels projets, ils offriront une bien meilleure précision, car ils seront alors mieux focalisés et plus intenses.

Une nécessaire miniaturisation

Les lasers à atomes semblent également prometteurs dans un domaine très prospectif : l'informatique quantique, dans laquelle chaque unité d'information (bit) est portée par un atome individuel (contre plusieurs centaines de milliers d'atomes aujourd'hui). Une des propositions pour fabriquer un ordinateur quantique consiste à disposer régulièrement les atomes sur une surface et à contrôler les échanges d'informations entre eux. Or, l'interaction entre un faisceau organisé de lumière (laser optique) et un faisceau organisé de matière (laser à atomes) peut permettre de piéger préférentiellement des atomes sur des sites régulièrement espacés, et former ainsi la trame d'un futur ordinateur quantique.

Les applications des lasers à atomes ne seront pas nécessairement celles prévues au départ. De même, pour les lasers, qui avait prévu que l'une des principales applications serait l'enregistrement audiovisuel? Toutes ces applications nécessiteront une importante miniaturisation des techniques de manipulation des atomes. De nombreux efforts sur la fabrication de « puces à atomes », dans lesquelles le condensat serait contenu dans un centimètre carré, portent leurs fruits : nous savons fabriquer des cir-



CETTE « PUCE À ATOMES », d'une surface de 1 cm², permet de fabriquer et de guider les condensats, ouvrant la voie à la miniaturisation des lasers à atomes.

cuits imprimés par micro-lithographie dans lesquels des champs magnétiques piègent et guident les atomes condensés. Grâce à nos puces atomiques, nous envisageons de créer des milliers de pièges par centimètre carré, joints par des zones de guidage.

Le condensat de Bose-Einstein connaît aujourd'hui un succès qu'Einstein n'aurait certainement pas imaginé, lui qui semblait sceptique sur sa découverte. Trois groupes travaillaient sur ce sujet en 1995. Nous sommes aujourd'hui plus de cent, dont plusieurs laboratoires en France, cherchant à la fois à mieux comprendre la condensation et les interactions entre les atomes, mais aussi à fabriquer des lasers à atomes continus et à développer leurs applications: 7 types d'atomes ont été condensés, et ce n'est pas fini. Plusieurs industriels suivent de près ces recherches en co-finançant des thèses, mais néanmoins sans s'engager plus avant pour l'instant. Les lasers à atomes ne demandent qu'à sortir des laboratoires pour conquérir les industries de pointe, voire à plus long terme notre vie quotidienne. Certes, l'obtention du condensat n'est pas encore une expérience de routine mais, au fur et à mesure, nous apprenons à simplifier et miniaturiser les dispositifs.

C. W., P. B. et C. M.

POUR EN SAVOIR PLUS

Alain Aspect et Jean Dalibard, « Le refroidissement des atomes par laser », *La Recherche*, janvier 1994.

http://atomoptic.iota.u-psud.fr

Le site des auteurs de l'article.

www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/

Des explications sur le refroidissement des atomes.

www.colorado.edu/physics/2000/index.pl

En cliquant sur « The atomic lab », puis sur « Bose-Einstein condensation », vous accéderez à des animations très pédagogiques sur les condensats et le refroidissement.