

**Texte de la 223<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 10 août  
2000.**

**La superfluidité  
par Sébastien Balibar**

Il existe des liquides plus ordonnés que les autres, qu'on appelle « superfluides » parce que leur viscosité est nulle. Or la superfluidité est une propriété quantique, visible à l'œil nu et spectaculaire. L'hélium liquide par exemple, lorsqu'il devient superfluide, cesse de bouillir, jaillit en fontaine lorsqu'on le chauffe, s'écoule spontanément hors des récipients où l'on tente de l'enfermer, présente des tourbillons tous identiques, etc. De plus, notre compréhension détaillée de la superfluidité est à peine en train de s'achever en l'an 2000. Enfin si l'on réalise que la supraconductivité de certains métaux tient à la superfluidité de ses charges électriques, que l'intérieur des étoiles à neutrons est sans doute superfluide, et que l'on a découvert en 1999 que certaines vapeurs alcalines peuvent être superfluides et conduire à la réalisation de lasers à atomes, on voit que la superfluidité est très loin de n'être qu'une curiosité de laboratoire. Sa découverte au XX<sup>e</sup> siècle aura constitué un progrès scientifique majeur, reconnu par l'attribution de très nombreux prix Nobel, et dont les conséquences au XXI<sup>e</sup> ne sont pas encore toutes connues.

**Une découverte historique**

L'histoire de la superfluidité<sup>1</sup> débute en 1927, à Leiden en Hollande, lorsque W.H. Keesom et son équipe ont découvert, avec une certaine surprise j'imagine, que l'hélium liquide existait sous deux formes très différentes, bien qu'il soit constitué de petits atomes sphériques sans propriétés

---

<sup>1</sup> Pour une première approche de cette histoire, on pourra consulter l'article « Superfluidité » que j'ai écrit dans l'*Encyclopaedia Universalis* et surtout les références qui s'y trouvent, en particulier le numéro 141 (1938) de la revue *Nature*. Les deux livres de J. Wilks, *The properties of liquid and solid helium*, Clarendon Press, Oxford 1970, et *Introduction to liquid helium* Clarendon Press, Oxford 1987 restent des références incontournables pour la physique de l'hélium, ainsi que ceux de F. London (*Superfluids I and II*, Wiley, New York, 1950 and 1954). On pourra consulter aussi K. Gavroglu, *Fritz London: a scientific biography*, Cambridge University Press, Cambridge

particulières, ni chimiques ni magnétiques. Entre ces deux formes d'hélium liquide, traditionnellement appelées « hélium I » et « hélium II », existe un vrai changement d'état physique que signale un pic de chaleur spécifique en forme de lettre grecque lambda, d'où le nom de « point lambda » attribué à la température de transition ( $T_{\lambda} = 2.17$  Kelvin soit environ - 271 degrés centigrades). Au cours de la décennie suivante, on a ensuite compris qu'en dessous de ce point lambda l'hélium liquide cesse d'être un liquide léger classique: sa conductivité thermique devient remarquablement grande (W.H. Keesom et sa sœur A.P. Keesom, Leiden, 1936 ; J.F. Allen, R. Peierls and M.Z. Uddin, Cambridge, 1937) et sa viscosité disparaît (J.O. Wilhelm, A.D. Misener et A.R. Clark sous la direction de E.F. Burton, Toronto, 1935 ; J.F. Allen et A.D. Misener, Cambridge, 1938 ; P. Kapitza, Moscou, 1938). Inventeur du mot « superfluide » pour décrire l'hélium II, Kapitza a obtenu le prix Nobel, en 1978 peu avant de mourir.

Si l'on pompe sur de l'hélium liquide, dans un cryostat bien isolé thermiquement, il bout en se refroidissant, comme tout liquide ordinaire. Mais dès qu'on passe en dessous de 2,17K l'ébullition cesse. En effet, la grande conductivité thermique impose tout à coup une remarquable homogénéité de la température dans tout le liquide et élimine tous les points chauds susceptibles de nucléer des bulles; seule l'évaporation en surface demeure. La première impression visuelle que donne le plus largement répandu des superfluides est donc celle d'un liquide particulièrement calme. Cette impression d'ordre n'est pas fausse, pas simple à comprendre pour autant.

Comme par ailleurs la viscosité de l'hélium superfluide est nulle, il est susceptible de couler rapidement à travers d'infimes pores, capillaires ou fentes, même de dimensions atomiques, alors qu'à l'état normal c'est pratiquement impossible. Les fuites de superfluide sont donc le cauchemar des physiciens de ce domaine. Reprenant en 1936 des observations de Kammerlingh Onnes (Leiden, 1922), B.v. Rollin a mis en évidence une conséquence célèbre de cette absence de viscosité; l'hélium superfluide est en effet capable de remonter le long des bords des récipients qui le contiennent pour se vider à l'extérieur. De nombreux liquides forment un tel film au contact d'une paroi, c'est une question classique de mouillage, mais l'épaisseur de ce film n'étant que de quelques dizaines de nanomètres, il ne peut s'écouler à une vitesse notable que si le liquide est

---

1995, et A. Griffin, "A brief history of our understanding of BEC: from Bose to Beliaev", *Comptes-rendus de*

infiniment fluide. Nous verrons que l'hélium superfluide possède encore d'autres propriétés surprenantes.

À la lecture du volume 141 de la revue *Nature* (1938), on perçoit l'intensité de la compétition qui a dû animer un polygone Toronto-Cambridge-Moscou-Paris-Oxford-Leiden-Kharkov au cours de l'hiver 1937-38. À l'époque, aucune expérience n'était suffisamment précise pour fournir une indication du caractère quantique de la superfluidité. Pourtant, dès mars-avril 1938, Fritz London en eut l'intuition. Fuyant l'Allemagne nazie, de passage à l'Institut Henri Poincaré (Paris) avant de s'installer aux États-Unis, Fritz London eut l'idée que le point lambda devait résulter d'une « condensation de Bose-Einstein » des atomes d'hélium tout en signalant immédiatement les difficultés que son idée soulevait (cette « condensation » est une prédiction concernant des gaz alors que l'hélium dont il s'agit est liquide). On sait aujourd'hui que son intuition était bonne, mais on est à peine en train de comprendre comment résoudre la difficulté mentionnée, grâce en particulier à la découverte de superfluides gazeux. Un autre scientifique transitant par Paris au même moment avant de s'installer aux États-Unis, Laszlo Tisza, développa immédiatement une théorie phénoménologique de la superfluidité (le « modèle à deux fluides ») à partir des idées de London. C'est Tisza le premier qui prédit que dans un superfluide la chaleur ne se propage pas par diffusion comme dans un fluide normal, mais sous forme d'ondes. Ces ondes, plus tard appelées « deuxième son », devaient être découvertes par Peshkov, en 1946 à Moscou. Son modèle à deux fluides lui permit aussi d'expliquer que « l'effet fontaine », découvert par J.F. Allen et H. Jones en février 1938, est un effet de pression osmotique. Les idées de London et Tisza devaient être largement développées par la suite.

C'est en fait le grand théoricien L.D. Landau qui devait obtenir le prix Nobel pour la théorie de la superfluidité qu'il publia en 1941, après avoir été sauvé des geôles staliniennes par Kapitza<sup>2</sup>. Curieusement, sa théorie ne fait aucune mention de la condensation de Bose-Einstein bien qu'il s'agisse d'un modèle à deux fluides assez semblable à celui de Tisza. Le grand mérite de Landau est tout d'abord d'avoir décrit la réponse de l'hélium liquide à une excitation extérieure en

---

*l'"Enrico Fermi Summer School", CXL, Varenna, Italy, (IOS Amsterdam 1999).*

<sup>2</sup> L.D. Landau, *J. Phys USSR* 5, 71 (1941) et 11, 91 (1947), *Collected Papers* p. 301 et 466, ed. by D. Ter Haar (Pergamon Press 1965).

termes de modes collectifs. Ces modes collectifs sont essentiellement des ondes sonores quantifiées, les « phonons », bien que Landau ait publié de longs développements sur d'autres modes collectifs, qu'il pensait être des tourbillons élémentaires, les « rotons ». On retient surtout qu'il en a déduit ensuite que la superfluidité ne pouvait exister au delà d'une vitesse limite qu'il appela « vitesse critique ». Un superfluide ne s'écoule en effet sans viscosité apparente que si sa vitesse est inférieure à une certaine borne.

Quant à calculer la vitesse critique à partir de laquelle on observe l'apparition d'une dissipation d'énergie dans l'écoulement d'un superfluide, c'est un problème difficile qui est toujours d'actualité. On n'observe la vitesse critique de Landau que dans des cas très exceptionnels où l'écoulement est microscopique. C'est le cas dans les expériences de mobilité d'ions qu'ont réussies Peter McClintock et son équipe, à Lancaster au début des années 80<sup>3</sup>, dans de l'hélium superfluide ultrapur et pressurisé. C'est aussi le cas dans les expériences très récentes du groupe que dirige Wolfgang Ketterle au MIT, où l'on déplace un pinceau de lumière dans une vapeur de sodium convenablement condensée<sup>4</sup>. En général, par exemple lorsqu'il s'agit d'écoulement d'hélium liquide à travers un trou, la vitesse critique observée est beaucoup plus faible. Les travaux de O. Avenel et E. Varoquaux (Saclay, 1985) ont montré qu'un écoulement superfluide perd de l'énergie cinétique par sauts quantifiés qui correspondent au passage à travers le trou de tourbillons eux aussi quantifiés<sup>5</sup>. Nous reviendrons sur ces tourbillons après avoir considéré le problème de la condensation de Bose-Einstein de façon un peu plus précise.

### **La condensation de Bose-Einstein**

Un peu d'histoire s'impose à nouveau car de très grands noms y interviennent, à une époque qui était celle de la naissance de la physique quantique. En 1924, Satyendra Nath Bose, jeune étudiant bengali, avait publié un article sur la physique statistique des photons (les quanta

---

<sup>3</sup> T. Ellis and P.V.E. McClintock, *Phil. Trans. R. Soc.* A315, 259 (1985).

<sup>4</sup> La revue de W. Ketterle, « Bose-Einstein condensation in dilute atomic gases: atomic physics meets condensed matter physics », *Physica B* 280, 11 (2000), est particulièrement claire et contient toutes les références nécessaires.

<sup>5</sup> O. Avenel and E. Varoquaux, *Phys. Rev. Lett.* 55, 2704 (1985).

de lumière). Au vu de cet article, Albert Einstein avait alors généralisé le travail de Bose à un gaz de particules massives identiques. L'article de de Broglie sur la dualité « onde-corpuscule », c'est-à-dire sur les ondes de matière, ne datait que de 1923 et l'article d'Einstein sur la condensation de Bose en constituait la première application. Certains pensent même que c'est en lisant l'article d'Einstein que Schrödinger découvrit le travail de de Broglie puis proposa sa célèbre équation<sup>6</sup>.

Einstein prévoyait donc qu'en dessous d'une certaine température critique, qui dépend de la densité du gaz, toutes les particules devaient commencer à se « condenser » c'est-à-dire à occuper ensemble le même état quantique fondamental. Avant de préciser cette notion délicate, il faut remarquer qu'Einstein, sceptique sur ses propres résultats, écrivit à Ehrenfest « the theory is pretty, but is there also some truth in it ? » À la suite de la thèse d'Uhlenbeck, alors qu'on ne comprenait pas encore que la matière puisse changer d'état autrement que de manière discontinue (ce problème fut grandement débloqué par Landau), il semble même que la condensation de Bose-Einstein ait acquis la réputation d'être surtout une pathologie théorique dont l'existence était purement imaginaire.

De quoi s'agit-il donc? La mécanique quantique associe une onde à toute particule, et décrit cette onde par une « fonction d'onde », solution de l'équation de Schrödinger. De même qu'une corde de violon peut vibrer selon différents modes et émettre ainsi des sons de hauteur différente, de même une particule quantique dans une boîte ou un électron dans un atome peuvent se trouver dans différents états quantiques correspondant à différentes fonctions d'onde et à différentes énergies. Einstein prédisait que les ondes représentant chaque particule s'accumulaient dans le mode fondamental de plus basse énergie, formant ainsi une onde macroscopique représentant le « condensat », fraction importante de l'ensemble des atomes devenus indiscernables les uns des autres. La condensation dont il s'agit n'est donc pas un changement de densité, comme lorsqu'un gaz se condense sous forme de liquide ou de solide. Elle représente un passage d'un comportement individuel désordonné des atomes à un comportement plus ordonné parce que collectif.

Arrêtons nous un instant sur ce passage ordre-désordre. La Physique du XX<sup>e</sup> siècle a montré que tout changement d'état de la matière résulte d'un tel passage. Il peut cependant s'agir

---

<sup>6</sup> A. Griffin, "A brief history of our understanding of BEC: from Bose to Beliaev", *Comptes-rendus de*

de différents types d'ordre. Ainsi, lorsqu'un liquide cristallise, ses constituants (atomes ou molécules) s'ordonnent dans l'espace ordinaire: leurs positions s'arrangent de manière régulière ce qui donne aux cristaux leurs formes symétriques. De même lorsqu'un matériau paramagnétique devient ferromagnétique c'est parce que tous les aimants microscopiques s'orientent dans une même direction. Dans le cas de la transition superfluide ce n'est pas une question d'ordre dans l'espace ordinaire, mais dans l'espace des vitesses: les atomes adoptent un état de repos collectif ou un état de mouvement collectif ordonné en présence d'une sollicitation extérieure. On a parfois évoqué l'image d'une foule se mettant à marcher au pas mais cela me paraît mal adapté car les atomes ne figent pas leurs positions respectives, ils deviennent indiscernables et occupent collectivement l'espace, leur mouvement éventuel est collectif au lieu d'être individuel.

Il existe par ailleurs un critère simple pour estimer la température à laquelle cette condensation a lieu. Il s'agit de comparer la « longueur d'onde de Broglie » des particules constituant le gaz à la distance moyenne entre ces particules. Cette longueur d'onde dépend de la température  $T$ , elle augmente lorsque  $T$  diminue, et caractérise l'extension du paquet d'onde associé à la particule. Si cette portée est comparable à la distance entre particules, alors ces ondes se recouvrent, les particules perdent leur caractère individuel et le gaz, qui devient « dégénéré » c'est à dire quantique, se condense au sens de Bose-Einstein.

Tous les gaz, à suffisamment basse température (ou haute densité), sont-ils donc censés se condenser de cette manière ? Pas du tout. La matière a le choix entre différents types d'ordre. Lorsqu'on refroidit un gaz ou qu'on le comprime, généralement, il cristallise. L'hélium est une exception parce qu'à pression modérée il reste fluide même à température nulle; c'est une conséquence du fait que ses atomes sont très légers et aussi ceux qui, parmi tous les éléments, s'attirent le moins les uns les autres. De plus, et ceci fut remarqué par Dirac en 1927, il existe deux sortes bien distinctes de particules quantiques. Les premières, dites « bosons », peuvent effectivement s'accumuler toutes dans le même état; au contraire, les secondes, dites « fermions », ne peuvent en aucun cas occuper le même état en vertu du « principe d'exclusion de Pauli ». Les photons sont bien des bosons, mais les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions.

---

*l'"Enrico Fermi Summer School", CXL, Varenna, Italy, (IOS Amsterdam 1999).*

La différence entre ces deux types de comportement statistique est une question subtile de symétrie. Quant aux atomes d'hélium, tout dépend de l'isotope dont on parle. Dans les années 30, seul l'hélium 4, constitué de deux protons, deux neutrons et deux électrons était disponible en quantités suffisantes. Avec son nombre pair de fermions, l'hélium 4 est bien un boson et peut effectivement se condenser. En revanche, l'hélium 3, isotope léger ne contenant qu'un seul neutron, est un fermion et l'histoire devait démontrer que cela fait bien une différence considérable.

### **Superfluidité, supraconductivité et condensation de Bose-Einstein**

Quel lien y a-t-il entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein? London avait essentiellement remarqué deux choses. Tout d'abord que le calcul de la température à laquelle un gaz parfait, de même densité que l'hélium liquide, devait effectuer cette condensation donnait 3,1K, une valeur proche des 2,17K observés. Ensuite que la variation en température de la chaleur spécifique de l'hélium liquide passait par un maximum assez semblable à celui que prévoyait aussi la théorie d'Einstein à la température de transition. Avec le recul du temps, la comparaison entre hélium 4 et hélium 3 me semble fournir un argument beaucoup plus fort en faveur d'un effet de statistique quantique.

Sur terre, l'hélium 4 est le produit stable de la « radioactivité alpha » naturelle. Il s'accumule en quantités importantes dans les puits de pétrole dont on l'extrait facilement (il est aussi présent dans l'atmosphère, bien sûr). L'hélium 3 est aussi un produit stable de réaction nucléaire, mais il s'agit cette fois de la désintégration du Tritium, l'isotope lourd de l'Hydrogène. Les chercheurs n'ont pu se procurer suffisamment d'hélium 3 qu'après la seconde guerre mondiale, lorsque l'industrie militaire a manipulé suffisamment de Tritium pour ses bombes H. Quoiqu'il en soit des retombées très pacifiques de l'industrie de l'armement, on a démontré dans les années 50 que l'hélium 3 liquide présentait quelques similitudes mais aussi de grosses différences avec l'hélium 4. L'hélium 3 et l'hélium 4 se liquéfient à des températures comparables (quelques degrés absolus) ; ils cristallisent aussi à des pressions comparables (une trentaine d'atmosphères). Mais entre 1K et 0,005K, là où la viscosité de l'hélium 4 disparaît, celle de l'hélium 3 augmente

considérablement ! London et Tisza accueillirent ces résultats avec un soulagement qu'on imagine aisément. De fait, la différence de comportement statistique entre ces deux isotopes est telle qu'ils se séparent spontanément, comme l'huile du vinaigre, en dessous d'une fraction de Kelvin, une propriété qui sous-tend toute la technologie des réfrigérateurs « à dilution » modernes, c'est-à-dire toute la cryogénie entre 0,002 et 1K.

Malgré tout, en 1971 à Cornell (États-Unis), D.D. Osheroff, R.C. Richardson et D.M. Lee ont découvert que l'hélium 3 devenait lui aussi superfluide, à une température 1000 fois plus basse que l'hélium 4, aux alentours de 2 millikelvins. Comment est-ce possible ? En fait, Kapitza avait introduit le mot « superfluid » par analogie avec le mot « superconductor », sans réaliser à quel point les deux phénomènes sont semblables. On sait aujourd'hui que la supraconductivité n'est rien d'autre que la superfluidité d'un fluide chargé<sup>7</sup>. Elle fut découverte en 1911 à Leiden, par H. Kammerlingh Onnes qui mesurait la conductivité électrique du mercure. Mais il fallut attendre 1957 pour que J. Bardeen, L.N. Cooper et J.R. Schrieffer en comprennent les mécanismes. À condition de se regrouper en paires (les « paires de Cooper »), les électrons devenaient bosons et étaient susceptibles de se condenser. Un métal qui devient supraconducteur voit sa résistance électrique disparaître parce que ses charges électriques mobiles deviennent superfluides. Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, on a progressivement découvert que cela concernait de très nombreux autres métaux que le mercure, par exemple le plomb, l'étain, l'aluminium, le zinc... les alliages de Niobium sans lesquels l'imagerie médicale moderne ne serait pas ce qu'elle est, des composés organiques et de nombreux oxydes de cuivre, yttrium lanthane ou bismuth, découverts à partir des travaux de G. Bednorz et K.A. Muller à Zürich en 1986 et qui constituent la famille des « supraconducteurs à haute température critique » parce qu'ils montrent cette propriété remarquable aux alentours d'une centaine de Kelvins. Tous les chercheurs cités dans ce paragraphe ont été couronnés par le prix Nobel et nous allons en rencontrer quelques autres que je laisse au lecteur le soin de reconnaître.

Pour ce qui est donc de l'hélium 3, différents travaux franco-américains (P.W. Anderson et P. Morel en 1961 puis R. Balian et R. Werthamer en 1963) avaient proposé un mécanisme d'appariement entre atomes qui pouvait conduire à différents types de superfluidité. C'est bien ce

qui fut découvert à Cornell et permit ensuite d'étudier une variété de propriétés physiques d'une incroyable richesse puisque l'hélium 3 présente dans la région du millikelvin trois états superfluides différents avec des textures comme les cristaux liquides et des ondes de spin comme les matériaux ferromagnétiques.

Il ne fait donc aucun doute que la superfluidité est liée aux propriétés statistiques quantiques de la matière. Le problème difficile à résoudre est celui d'une démonstration rigoureuse et quantitative de ce lien. Une étape importante a été franchie par N.N. Bogoliubov en 1947. Il considéra en effet un cas intermédiaire entre celui de Bose-Einstein-London-Tisza, c'est-à-dire le gaz idéal sans interactions entre atomes, et le cas du liquide où ces interactions sont fortes. Dans un gaz de Bose, avec des interactions faiblement répulsives entre atomes, il démontra qu'une condensation de Bose-Einstein généralisée pouvait exister et que les excitations individuelles disparaissaient au profit de modes collectifs se propageant à la vitesse du son. Dans un tel gaz, à suffisamment basse température, on s'attendait donc à trouver une condensation dans un état superfluide. Ce travail mit longtemps à être reconnu, Landau en particulier s'acharnait à ignorer le lien entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein, London n'en entendit apparemment jamais parler. En 1956, Penrose et Onsager généralisèrent définitivement le concept de condensation de Bose-Einstein, démontrant que dans l'hélium liquide, à cause des interactions, la fraction des atomes formant le condensat n'était que d'environ 8 %, même à très basse température. De très difficiles expériences de diffusion de neutrons ont vérifié ce chiffre. Pourtant, une véritable chasse au superfluide gazeux commença, prenant parfois des allures de quête du Graal. Dans un tel gaz superfluide, tout serait calculable, et vérifiable avec précision.

### **Les gaz superfluides**

Comme la longueur d'onde de de Broglie augmente lorsque la masse de la particule diminue, et comme refroidir la matière aux environs du zéro absolu n'est pas facile, on pensa longtemps que le meilleur candidat était l'hydrogène, premier élément de la classification périodique. Il est

---

<sup>7</sup> A.J. Leggett, "Superfluidity", *Rev. Mod. Phys.* 71, S318 (1999) et J.R. Schrieffer and M. Tinkham

possible de dissocier les molécules d'hydrogène  $H_2$  avec une décharge électrique, de stabiliser ensuite les atomes H avec un champ magnétique, de les piéger dans une région de l'espace correspondant à un minimum de ce champ, de les refroidir vers 50 microkelvins en les évaporant de manière sélective hors de ce piège. Reste alors à observer le milliard d'atomes restant dans ce piège et à détecter sa condensation de Bose. Une expérience d'une telle difficulté n'a été réussie, à ce jour, que par une seule équipe au monde, celle de D.Kleppner et T.Greytak au MIT en 1998<sup>8</sup>. La superfluidité de cet hydrogène atomique condensé n'a pas encore été mise en évidence.

Mais l'hydrogène s'est révélé, entre temps, beaucoup moins bon candidat que divers alcalins. En 1995 en effet, l'équipe de Eric Cornell et Carl Wieman à Boulder a réussi à utiliser le « refroidissement laser » pour ralentir considérablement une vapeur de Rubidium sortant d'un four, à confiner ces atomes dans un piège magnétique, à les refroidir davantage par évaporation, et à visualiser leur condensation de Bose-Einstein aux environs du microkelvin<sup>9</sup>. Presque simultanément, l'équipe de Wolfgang Ketterle au MIT a réussi une expérience semblable avec du sodium de même que celle de R.B.Hulet à Rice avec du Lithium<sup>10</sup>. Ces différentes équipes ont obtenu des images du nuage d'atomes avec de la lumière visible ce qui est heureusement plus facile que dans le cas de l'hydrogène qui exige de l'ultraviolet. On peut imaginer ce piège comme un bol dans lequel les atomes oscilleraient comme des billes. Le mode d'oscillation quantique fondamental étant celui de plus basse énergie, c'est aussi celui pour lequel la probabilité de présence des atomes au fond du bol est la plus grande. Lorsque la condensation de Bose-Einstein a lieu, on voit donc les atomes se regrouper au fond du piège alors que les atomes non encore condensés continuent d'occuper tout le volume du piège. Ces images, spectaculaires au moins pour des physiciens, ont eu un retentissement considérable lors de leur publication à partir de 1995. Des dizaines d'autres équipes dans le monde préparent désormais quotidiennement des condensats de Bose-Einstein avec ces vapeurs alcalines. Elles peuvent en observer les propriétés pendant plusieurs secondes, le temps que cet état de la matière, malgré tout métastable, retombe dans un état plus stable.

---

“Superconductivity”, *Rev. Mod. Phys.* 71, S313 (1999).

<sup>8</sup> W. Ketterle, op. cit.

<sup>9</sup> M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman and E.A. Cornell, *Science* 269, 198 (1995).

<sup>10</sup> W. Ketterle, op. cit.

Il n'est pas possible ici de citer toutes les propriétés de ces condensats gazeux, que Claude Cohen-Tannoudji, prix Nobel 1997 pour ses travaux sur le refroidissement laser, a décrits lors de sa propre conférence. Je souhaite seulement boucler cette présentation abrégée de la superfluidité par une discussion de la température d'apparition de la superfluidité et par une description des tourbillons quantiques, l'une des preuves les plus remarquables du lien entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein.

Ces différents gaz superfluides fournissent enfin ce que cherchaient les physiciens depuis longtemps: des condensats de Bose-Einstein dans lesquels l'intensité des interactions entre atomes est variable. Ces interactions sont très faibles dans l'Hydrogène, un peu plus intenses dans le Sodium et le Rubidium 87, encore davantage dans le Rubidium 85. Un test important de la théorie consistait donc à calculer puis à vérifier la variation de la température de transition superfluide avec les interactions. Cette température augmente-t-elle ou diminue-t-elle avec l'intensité de ces interactions ? Différentes réponses contradictoires ont été publiées, mais on admet généralement aujourd'hui les résultats de P. Grüter, D. Ceperley (Urbana) et F. Laloë (ENS, Paris)<sup>11</sup>. Ces trois chercheurs ont prédit en 1997 que cette température augmente avant de diminuer. Or les travaux de J. Reppy à Cornell<sup>12</sup> semblent apporter un début de vérification de ce comportement non-monotone, qu'il n'était pas facile d'imaginer a priori. Curieusement, Reppy travaille sur de l'hélium dilué dans un verre poreux et cette permanence de l'hélium sur le devant de la scène en Physique a quelque chose de vraiment étonnant. En fait, il semble que le candidat idéal pour une vérification précise de tout cela soit le Rubidium 85 et que ces travaux soient en cours.

Venons en finalement aux tourbillons quantiques<sup>13</sup>. Le fait qu'on puisse représenter le superfluide par une fonction d'onde macroscopique a une autre conséquence remarquable, ainsi que l'a remarqué Feynman (1955) à la suite des travaux d'Onsager (1949). Cette fonction doit avoir une amplitude et une phase définies en chaque point de l'espace; or la vitesse du superfluide n'est autre que la dérivée spatiale de cette phase, à une constante simple près. Un calcul

---

<sup>11</sup> P. Grüter, D. Ceperley et F. Laloë, *Phys.Rev. Lett.* 79, 3549 (1997).

<sup>12</sup> J.D. Reppy, B.C. Crooker, B. Hebral, A.D. Corwin, J. He and G.M. Zassenhaus, *Phys. Rev. Lett.* 84, 2060 (2000).

<sup>13</sup> On trouvera tout sur les tourbillons quantiques dans le livre de R.J. Donnelly, *Quantized vortices in helium II*, Cambridge Studies in Low Temperature Physics, Cambridge University Press, (Cambridge 1991).

élémentaire permet alors de démontrer que tous les tourbillons sont identiques dans un superfluide comme l'hélium 4 ou dans les vapeurs alcalines (le cas de l'hélium 3 est plus complexe); le fluide tourne autour d'un cœur normal de très faible diamètre et, à une distance  $r$  de ce cœur, la vitesse de rotation est égale à  $h/mr$  où  $h$  est la constante de Planck et  $m$  la masse des atomes. Que se passe-t-il donc lorsqu'on met un superfluide en rotation à vitesse croissante ? Au début, les parois tournent sans entraîner le fluide. Lorsqu'on atteint la vitesse critique, les tourbillons apparaissent, un par un. Ils forment alors un réseau régulier de lignes de plus en plus serrées à mesure que la vitesse de rotation augmente. La quantification des tourbillons a été vérifiée, par W.F. Vinen en 1961 puis par d'autres. A Berkeley en 1979-82, E.J. Yarmchuk et R.E. Packard ont réussi à visualiser les réseaux de tourbillons dans ce même hélium 4. Enfin, au début de l'année 2000, l'équipe de Jean Dalibard, à l'ENS (Paris), a obtenu des images de tourbillons dans un condensat de Rubidium qui sont remarquablement semblables à celles obtenues dans l'hélium. Aujourd'hui, plus personne ne peut donc douter que la superfluidité est un phénomène quantique, étroitement lié à la condensation de Bose-Einstein.

### **La superfluidité hors des laboratoires de recherche**

Il existe d'autres superfluides, que je n'ai pas encore cités. La matière nucléaire en fournit au moins deux exemples importants. Dans un noyau, à l'intérieur d'un atome, la température n'est pas forcément basse mais la densité est énorme. L'étude de la rotation des noyaux atomiques a montré que lorsque le nombre de neutrons et le nombre de protons sont pairs, ils sont tous appariés, forment ainsi des bosons et sont condensés. Les noyaux impairs ont des propriétés de rotation très différentes des noyaux pairs. A une échelle très différente, il est généralement admis que les sursauts des étoiles à neutrons sont liés à leur superfluidité. L'idée fut proposée par D. Pines en 1971, modifiée par P.W. Anderson et N. Itoh en 1975, et suscite toujours une abondante littérature scientifique<sup>14</sup>. Ces étoiles résultent de l'explosion d'une supernova, lorsque la masse totale n'est pas suffisante pour aboutir à un trou noir. Il faut imaginer la masse d'un soleil,

concentrée sur un rayon de 10 km ( $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> !), et tournant à une vitesse folle (jusqu'à 30 tours par seconde!) en émettant de flashes lumineux. Or la fréquence de ces flashes saute parfois à une valeur différente pour revenir plus lentement à sa valeur initiale. On pense généralement que ces « sursauts » sont liés au décrochage du réseau de tourbillons quantiques dans un superfluide de neutrons appariés, sous une croûte de neutrons solides. Ainsi, la superfluidité est une propriété de la matière qui a des conséquences bien au delà de nos laboratoires.

À quoi servent enfin les superfluides ? Bien sûr, l'hélium superfluide est un réfrigérant performant, sans lequel les aimants supraconducteurs de certains grands accélérateurs ne pourraient pas fonctionner. Mélangé à de l'hélium 3 non-superfluide, il fournit aussi depuis plus de 30 ans les millikelvins nécessaires à une étude détaillée de la supraconductivité, de nombreuses propriétés des semi-conducteurs, du magnétisme, des verres, etc. De même que des dispositifs supraconducteurs (les « SQUIDS ») permettent de mesurer des champs magnétiques avec une très grande précision, il est possible de mesurer des rotations absolues avec un superfluide, par exemple la rotation de la terre, mais il n'est pas certain que cette méthode soit plus performante que d'autres. Par ailleurs, l'hélium superfluide étant plus ordonné qu'un liquide ordinaire, il a fourni un remarquable modèle pour l'étude des changements d'état de la matière qui, ceux là, ne sont pas forcément quantiques. J'ai ainsi longuement étudié l'évaporation de l'hélium 4 superfluide (un phénomène qui ressemble à l'effet photoélectrique), la cristallisation de l'hélium superfluide (ce qui m'a permis de comprendre beaucoup mieux pourquoi les cristaux ont des facettes), la cavitation et d'autres problèmes de nucléation, etc. Enfin, la transition superfluide elle-même est un modèle que l'on étudie jusque dans les navettes spatiales pour tester la théorie moderne (dite « de renormalisation ») des changements d'états continus de la matière.

L'une des perspectives d'applications les plus spectaculaires des gaz superfluides est sans doute la réalisation de lasers à atomes. En fait, un condensat de Bose gazeux n'est rien d'autre qu'une onde cohérente de matière où les atomes sont aussi indiscernables que les photons dans un laser habituel. Lorsque le condensat reste piégé, cette onde est stationnaire dans le piège. Mais il suffit, comme l'a montré Wolfgang Ketterle avec du Sodium, de laisser fuir un condensat à

---

<sup>14</sup> D. Pines, Proc. XII Int. Conf. Low Temp. Phys., ed. by E. Konda (Keigaku, Tokyo 1971); P.W.

l'extérieur de son piège pour émettre une onde de matière qui se propage et est susceptible de montrer le même type d'interférences qu'un laser lumineux<sup>15</sup>. Quelles peuvent être un jour les applications d'un tel laser à atomes ? je crois que nous ne le savons pas encore. Une seule chose me paraît sûre: la liste des prix Nobel associés à la superfluidité, pourtant longue déjà, n'est pas close.

---

Anderson et N. Itoh, *Nature* 256, 25 (1975).

<sup>15</sup> W. Ketterle, op.cit.