

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

LES BASSES TEMPÉRATURES

ET

L'ŒUVRE DE M. KAMERLINGH ONNES

ASSOCIÉ ÉTRANGER DE L'ACADÉMIE

PAR

M. ÉMILE PICARD

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL

LECTURE FAITE EN LA SÉANCE PUBLIQUE ANNUELLE DU 18 DÉCEMBRE 1939

MESSIEURS,

Je me propose aujourd'hui de vous parler des basses températures, ce qui me permettra de rappeler l'œuvre considérable d'un de nos anciens Associés étrangers, M. Kamerlingh Onnes, le fondateur du célèbre Laboratoire cryogène de l'Université de Leyde.

I.

De bonne heure l'homme obtint des températures assez élevées au moyen de combustions. Ce n'est au contraire qu'à une époque relati-

vement récente que l'on put obtenir de basses températures, en conservant la neige et les glaces de l'hiver. Au xviii^e siècle, Réaumur fit une étude systématique des mélanges réfrigérants. Dès le début du xix^e siècle, on réussit à liquéfier quelques gaz. Tel fut d'abord le gaz sulfureux. Monge le liquéfia en le faisant passer après dessiccation dans un petit ballon entouré d'un mélange de glace et de sel marin. La liquéfaction se produisait à -8° à la pression atmosphérique. Pour liquéfier le gaz ammoniac, Guyton de Morveau opérait de même, mais en employant un mélange réfrigérant formé de glace et de chlorure de calcium. On liquéfia ensuite les gaz par compression. Ainsi, en 1824, Davy et Faraday eurent recours au procédé suivant. Dans une des branches d'un tube de verre recourbé et très résistant, ils introduisaient les matières destinées à produire le gaz, puis on fermait à la lampe l'autre extrémité. Ces matières étaient chauffées de manière à produire le dégagement de gaz, pendant qu'on refroidissait l'autre extrémité du tube en le plongeant dans la glace. Un liquide apparaissait alors dans la branche refroidie. Ainsi furent liquéfiés le chlore, le cyanogène, l'acide sulfhydrique.

En partant du même principe, Thilorier, en 1834, construisit un grand appareil permettant d'obtenir plusieurs litres d'acide carbonique liquide.

On utilisa ensuite la compression obtenue par une pompe et l'abaissement de température. En 1845, Faraday utilise comme mélange réfrigérant une pâte formée d'anhydride carbonique solide et d'éther, et put ainsi refroidir jusqu'à -100° ; la compression était obtenue jusqu'à 50^{atm} à l'aide d'une pompe foulante. On obtient ainsi à l'état liquide l'éthylène et l'hydrogène phosphoré. A la fin de 1877, six gaz avaient résisté à toutes les tentatives de liquéfaction; c'étaient l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le bioxyde d'azote, l'oxyde de carbone et le méthane ou gaz des marais. On les appelait les gaz *permanents*. Nous les retrouverons bientôt.

Pour terminer cet historique sommaire des temps primitifs de la liquéfaction des gaz, ajoutons que c'est seulement en 1860 que l'on

se préoccupa de faire industriellement du froid. L'ingénieur français Charles Tellier construisit la première machine à faire le froid par évaporation de l'ammoniac liquéfié. En 1867, il construisit la première machine frigorifique, où le même gaz était successivement liquéfié par compression, évaporé, liquéfié de nouveau, de manière à subir indéfiniment le même cycle de transformations sans perte de substance. Sur un appareil de ce type est basée l'industrie frigorifique actuelle.

II.

Dans ce qui précède, nous avons parlé constamment de température; mais c'est un point sur lequel il nous faut revenir. L'homme, qui avait la sensation de froid et de chaud, chercha d'assez bonne heure à fixer par un nombre les sensations qu'il éprouvait. On eut l'idée vague d'un équilibre thermique entre deux corps placés en contact dans des conditions convenables, par exemple un solide et un liquide dans lequel il est plongé, qui se mettent en un tel équilibre; l'observation montra bientôt que deux corps en équilibre thermique avec un troisième sont eux-mêmes en équilibre. Ainsi fut créé le thermomètre. Soit, par exemple, un gaz dont on mesure la température avec notre classique thermomètre centigrade. Considérons un gaz du type des gaz que l'on dit *parfaits*, satisfaisant aux lois classiques de Mariotte et de Gay-Lussac, cette dernière affirmant qu'ils ont tous le même coefficient de dilatation, sensiblement égal à $\frac{1}{273}$. Ces lois permettent d'écrire que, pour une masse déterminée d'un gaz donné en équilibre, prise dans deux conditions différentes de pression de volume et de température, le rapport des produits des volumes par les pressions est égal au rapport *des températures centigrades augmentées de 273*. On voit ainsi apparaître pour la première fois la température centigrade augmentée du nombre 273 (1). Cette dernière somme, qui va revenir constamment par la suite, est appelée *la température*

(1) Le nombre 273 est remplacé aujourd'hui par le nombre 273,15. Nous avons gardé pour abrégé 273. Il sera tenu compte ultérieurement de la modification.

absolue. Ainsi, si notre masse de gaz n'a pas changé de volume, le rapport des pressions est égal au rapport des températures absolues. On peut remarquer que cette échelle de températures a été dite absolue, parce qu'elle est indépendante du gaz parfait envisagé, et, d'après ce qui précède, c'est seulement *un rapport de températures absolues* que l'on mesure. Seul le rapport des températures absolues a une signification physique.

Le zéro absolu correspond manifestement à la température -273° de notre thermomètre centigrade. On prend souvent le zéro absolu comme origine des températures. La glace fondante correspond alors à $+273^{\circ}$. Avec cette origine, les températures sont toujours positives: on est convenu, dans ce cas, de mettre la lettre K à la suite du nombre exprimant la température (en l'honneur de Lord Kelvin). Pour la graduation centésimale ordinaire avec origine à la glace fondante, on met la lettre C à la suite du nombre indiquant la température. Ainsi -100° C. et 173° K représentent, avec des origines différentes, la même température.

Les lois élémentaires de Mariotte et de Gay-Lussac nous ont conduit à la notion de température absolue. On peut retrouver cette notion en considérant les machines thermiques, telles que les a envisagées Sadi Carnot dans son *Mémoire sur la Puissance motrice du feu*, paru en 1824. Supposons qu'une telle machine décrive un cycle d'une manière réversible. Prenons-nous, pour prendre un exemple simple, à une machine réversible en contact avec une source chaude et une source froide de températures absolues respectives T_1 et T_2 , et soient Q_1 et Q_2 les quantités de chaleur échangées avec les sources chaude et froide. Le rapport de ces quantités de chaleur est égal au rapport des températures absolues correspondantes. C'est donc au moyen de quantités de chaleur que l'on mesurera ici le rapport des températures absolues, et ce rapport ne dépend pas de la substance travaillant dans les conditions indiquées. La remarque faite plus haut sur la signification physique du rapport des températures absolues peut encore ici trouver sa place.

Nous avons, dans ce qui précède, supposé parfait le gaz qui nous servait à mesurer les températures, ou, tout au moins, supposé ce gaz très voisin de cet état, ce qui suppose le gaz très loin de son point de liquéfaction. On peut lever la difficulté en partant de ce fait expérimental que tous les gaz définissent pratiquement la même échelle de température quand ils sont à des pressions suffisamment basses. Il est possible aussi de chercher à comparer directement à l'échelle absolue l'échelle d'un thermomètre réel. Les mesures de l'effet dit de *Joule-Thomson* en donnent le moyen. Cet effet correspond à la détente adiabatique irréversible d'un gaz, l'écoulement ayant lieu par un tube étroit muni d'un tampon serré de ouate. Une différence de température est observée, et c'est de là que peut se déduire la correction cherchée. Rappelons que, dans l'effet Joule-Thomson, on a le plus souvent un abaissement de température. C'est ce qui arrive notamment dans le cas de pressions très fortes et aussi pour des gaz plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte. Pour l'hydrogène au contraire, on peut avoir une élévation de température; cependant, même pour ce gaz, si l'on opère à une température suffisamment basse pour qu'il devienne plus compressible que ne l'indique la loi de Mariotte, on obtiendra un refroidissement. On donne souvent le nom de *point de Joule-Thomson* à la température au-dessous de laquelle la détente du gaz préalablement comprimé se fait avec abaissement de température.

Sans insister davantage sur ces comparaisons et corrections délicates, nous admettons que nous avons la possibilité de mesurer toutes les températures à l'échelle absolue correspondant à un gaz parfait.

On emploie pour la mesure des températures des thermomètres variés. Signalons ici le thermomètre à hydrogène et le thermomètre à hélium, particulièrement utilisés dans les questions qui vont nous occuper. On les emploie le plus souvent à volume constant, et le rapport des températures absolues, conformément à ce que nous avons dit plus haut, correspond à un rapport de pressions. On emploie aussi des thermomètres à résistance de platine ainsi que

des couples thermo-électriques. Nous aurons à revenir sur l'importante question de la résistance électrique des métaux aux très basses températures.

III.

Quelques données essentielles relatives à la compressibilité d'un corps pur à l'état fluide doivent encore être rappelées. Pour une pression suffisamment élevée un gaz réel s'écarte de la loi de Mariotte. Il y a, pour une masse donnée de gaz à une température donnée, une relation entre la pression et le volume, qui peut se traduire par une courbe rapportée à un axe des volumes et un axe des pressions. Une *isotherme* est une courbe qui, pour une température donnée, représente la relation entre la pression et le volume du fluide envisagé; ce sont les courbes d'*Andrews*. C'est de ce réseau de courbes déterminées expérimentalement qu'on déduit les propriétés physiques du fluide. Il y a pour celui-ci une température critique, qui joue un rôle essentiel, et à cette température s'associent une pression et un volume critiques. Au-dessus de la température critique, le fluide est toujours à l'état gazeux. Les isothermes correspondantes sont des courbes pour lesquelles les pressions vont toujours en croissant quand le volume diminue. Au-dessous de la température critique, le fluide est d'abord à l'état gazeux quand le volume est assez grand, puis, le volume diminuant, commence un changement d'état à pression constante qui correspond à un mélange de liquide et de vapeur. Enfin, le volume continuant à décroître, la pression va en augmentant et il n'y a plus que du liquide. On voit donc que, au-dessous de la température critique, l'isotherme présente un palier (liquide, vapeur). Pour la température critique, ce palier se réduit à un point répondant au volume et à la pression critique (1).

(1) Au point de vue historique, il est intéressant de noter qu'une expérience très particulière de Cagniard de Latour aurait pu faire soupçonner l'existence d'une température critique pour une vapeur. En effet, des expériences anciennes de Cagniard de Latour montraient que l'éther placé dans un endroit clos ne peut rester liquide à une température supérieure à 190°; il éprouve alors la vaporisation totale. En d'autres termes, la vapeur

Pour l'anhydride carbonique (acide carbonique) la température critique est 31°C ; ce gaz ne peut donc être liquéfié à une température supérieure à 31°C . Pour l'oxygène, la température critique est -119°C . D'une manière générale, le gaz ayant été amené à une température inférieure à la température critique, il faut de plus pour la liquéfaction que la pression soit suffisamment élevée.

Nous avons vu que, pour la liquéfaction de quelques gaz dont la température critique n'est pas basse, on peut utiliser des mélanges réfrigérants. Pour des gaz plus difficilement liquéfiables, on pourra dans certains cas refroidir par évaporation d'un liquide sous une pression assez faible. Mais la liquéfaction des gaz a été beaucoup facilitée quand Cailletet eut l'idée très heureuse d'employer le refroidissement produit par la détente. En décembre 1877, notre ancien Confrère expérimentait sur l'oxyde de carbone et sur l'oxygène, en refroidissant ces gaz à -30°C et les comprimant à 300^{atm} . Par une détente brusque, un nuage s'est formé, et même on a vu un moment des gouttelettes liquides. Cailletet observa les mêmes phénomènes avec l'air et l'azote. Il a d'ailleurs réalisé (*Comptes rendus*, tome XCVII), dans des cas simples, la *production des basses températures au moyen d'appareils continus*. Il dit dans la Note citée, où il emploie l'éthylène. : « J'ai appliqué le froid que donne la détente des gaz comprimés. J'ai disposé à cet effet dans un cylindre en acier un serpentín de cuivre dont les deux extrémités font saillie en dehors de ce vase cylindrique. C'est dans le vase et sur le serpentín même que s'opère la détente de l'éthylène au moyen d'un robinet de construction spéciale. On aspire dans le cylindre, au moyen de ma pompe à piston de mercure, l'éthylène détendu; puis après l'avoir comprimé par le jeu de la pompe et refroidi

d'éther à 190° et à toute température supérieure n'est pas liquéfiable par simple compression. Des observations analogues avaient été faites pour d'autres liquides volatils. On peut dire d'une manière générale que les expériences de Cagniard de Latour faisaient pressentir que, pour chaque vapeur et par suite pour chaque gaz, il existe une température au-dessus de laquelle la liquéfaction est impossible, quelle que soit la pression exercée.

dans un mélange réfrigérant, on le fait revenir dans le cylindre pour qu'il se détende de nouveau. Cet appareil réalise un cycle fermé dans lequel la même quantité d'éthylène liquéfié se détend et se régénère pendant un temps indéfini ». Et il ajoute, traçant un programme pour l'avenir : « Le froid excessif que l'on peut obtenir avec cet appareil me permettra d'obtenir de grandes quantités d'oxygène liquide, que je pourrai employer comme nouvelle source de froid, afin de tenter la condensation de l'hydrogène ».

En même temps que Cailletet, Pictet cherchait en 1877 à liquéfier quelques-uns des gaz permanents. Pictet n'avait pas recours, comme Cailletet, au froid produit par la détente; il opérait, comme l'avait fait Faraday dans des cas plus simples, en cherchant à liquéfier sous l'action de la pression un gaz refroidi. Des doutes ont été élevés au sujet des premières expériences de Pictet. Quant à Cailletet, ses expériences firent apparaître un nuage, preuve certaine de la liquéfaction du gaz étudié. Il dit lui-même en 1877, dans une Communication à l'Académie sur la liquéfaction de l'air : « On voit couler sur la paroi interne du tube *des filets sans aucun doute liquides*, qui semblaient très agités ».

Un peu plus tard, Wroblewski et Olzewski furent les premiers à obtenir certains gaz permanents à l'état liquide *statique*.

Le programme audacieux proposé en 1877 par Cailletet ne devait être appliqué que plus tard pour les gaz à très basse température critique. Nous reviendrons sur ces questions. Il y a d'ailleurs lieu de distinguer le refroidissement par détente sans travail extérieur notable et celui avec travail extérieur. Le premier cas se rattache à l'expérience de Joule-Thomson dont nous avons parlé plus haut. Le refroidissement par détente avec travail extérieur est plus énergique; il est l'inverse de l'échauffement du gaz par compression.

La liquéfaction industrielle de l'air, qui a un grand intérêt pratique, est obtenue aujourd'hui par diverses machines à air liquide. Les plus employées sont celles de Linde et de Georges Claude. Dans l'appareil

Linde, la détente est produite sans travail extérieur. L'air comprimé à 200^{atm} circule dans un serpentín terminé par un robinet de détente. Il s'échappe par ce robinet en se détendant à une pression d'environ 20^{atm}. Cette détente est accompagnée d'un abaissement de température, insuffisant cependant pour amener à l'état liquide l'air sortant du serpentín. Pour amener l'air au-dessous de sa température critique, qui est un peu inférieure à -140°C , on provoque des refroidissements progressifs. L'air qui vient d'être refroidi circule dans un second serpentín entourant le premier. Les opérations précédentes peuvent être répétées un certain nombre de fois, et un moment arrive où l'air est suffisamment refroidi pour que la liquéfaction devienne possible. Ces opérations successives figurent d'ailleurs dans de nombreux appareils de liquéfaction. Dans l'appareil de Georges Claude, l'air sortant du serpentín se détend dans le cylindre d'un moteur en fournissant un travail extérieur utilisable. L'abaissement de la température dans les cylindres successifs est, nous l'avons dit, plus considérable que quand il n'y a pas de travail extérieur. On peut opérer dans l'appareil de Claude sous des pressions moins élevées que dans le dispositif de Linde ⁽¹⁾.

Tels furent, sommairement rappelés, les principes utilisés dans la question des basses températures. Nous avons dit notamment le rôle important joué par Cailletet en 1877 quand il utilisa le refroidissement produit par la détente. Des gaz dits permanents, tels l'oxygène et l'azote, furent ensuite liquéfiés à l'état statique, et l'on détermina leurs températures critiques de -119°C et -145°C .

Après les rapides indications historiques, qui m'ont semblé indispensables pour la suite, je m'arrêterai maintenant sur l'œuvre à laquelle reste attaché le nom de notre ancien Associé étranger, M. Kamerlingh Onnes, l'illustre fondateur du Laboratoire cryogène de l'Université de Leyde.

(1) On lira avec grand intérêt un article de M. Camille Raveau sur la liquéfaction de l'air. Voir : CAMILLE RAVEAU, *Sur la liquéfaction industrielle de l'air* (Soc. franc. de Phys., 2 juillet 1916, p. 37).

IV.

Kamerlingh Onnes naquit à Groningue (Pays-Bas) le 21 septembre 1853. Il était l'aîné des cinq enfants d'un grand industriel de cette ville. En 1871, il commença ses études à l'Université de sa ville natale, où il eut pour condisciple H. A. Lorentz, qui devait devenir aussi Associé étranger de notre Académie. Il alla plus tard compléter ses études à Heidelberg sous la direction de Kirchhoff et de Bunsen, et il fut dans cette ville le condisciple de Gabriel Lippmann. A la fin de chaque année, il y avait un prix pour le meilleur élève du laboratoire. En quittant Heidelberg, Lippmann eut ce prix, qui fut décerné l'année suivante à Kamerlingh Onnes.

De retour en Hollande, Kamerlingh Onnes devint assistant du Professeur Bosscha pour la physique à l'École Polytechnique de Delft, et il fut bientôt Docteur ès sciences mathématiques et physiques, avec une thèse sur les preuves de la rotation de la Terre. Il publia bientôt après, en 1881, un Mémoire qui joua un rôle important dans ses études ultérieures. Ce Mémoire était intitulé : *Théorie générale de l'état fluide*. Un éminent physicien hollandais, Van der Waals, dans une Communication du 25 septembre 1880 à l'Académie d'Amsterdam, avait énoncé la *Loi des États Correspondants*, d'après laquelle tous les fluides ont la même équation caractéristique, à coefficients numériques indépendants du fluide envisagé, pourvu qu'on rapporte la pression, le volume et la température à la pression critique, au volume critique et à la température critique de ce fluide. Mais la démonstration donnée par Van der Waals était très spéciale et supposait la validité de l'équation des fluides qui porte son nom. Kamerlingh Onnes montra que, en réalité, la théorie des états correspondants a un caractère plus général, et il remarqua que la correspondance des isothermes est l'expression de la similitude des mouvements mécaniques. On a depuis lors développé à ce sujet des considérations plus précises, en partant de l'hypothèse que la relation entre la pression, le volume et la température s'exprime par une

équation, la même pour tous les corps, où, en dehors de ces pression, volume et température figurent seulement *trois* constantes, variables d'un corps à l'autre. De simples considérations d'homogénéité donnent alors la loi des états correspondants. L'hypothèse faite sur les trois constantes peut évidemment être contestée. Pour certaines classes de corps cependant, la loi des états correspondants a été vérifiée, par exemple dans les remarquables expériences d'Amagat sur l'anhydride carbonique et sur l'éthylène, où un même diagramme convient aux deux corps rapportés aux unités indiquées. Mais il n'en est pas toujours ainsi, par exemple s'il faut introduire plus de trois constantes dans l'équation caractéristique. De longues discussions sur ce sujet il résulte que l'on a été conduit à partager les gaz en divers groupes, une loi des états correspondants s'appliquant seulement aux corps d'un même groupe. Ces remarques furent très utiles à M. Kamerlingh Onnes pour le prolongement de certaines courbes.

M. Kamerlingh Onnes remplaça bientôt M. Bosscha comme professeur à l'École Polytechnique de Delft, et fut nommé peu après en 1881, professeur de physique expérimentale et directeur du Laboratoire de Physique de l'Université de Leyde. Il avait alors 28 ans. A ses débuts, le laboratoire de Kamerlingh Onnes ne fut pas spécialisé; c'est là que Zeeman, alors professeur à la même Université, découvrit le phénomène magnéto-optique, relatif à l'action du magnétisme sur la lumière à l'état naissant, phénomène qui porte maintenant son nom, et dont Lorentz donna peu après une première explication théorique. Bientôt le laboratoire se spécialisa dans l'étude des basses températures, et, d'une manière générale, dans la physique et la chimie à ces températures. En faisant cette transformation de son Institut, Kamerlingh Onnes était convaincu que l'étude des corps aux basses températures permettrait de mieux analyser plusieurs des propriétés de la matière. La réalité a largement dépassé ces prévisions. Il y a un grand intérêt à simplifier les conditions dans lesquelles les phénomènes nous apparaissent, en supprimant autant que possible l'agitation thermique.

En vue d'expériences diverses, il fallait obtenir une succession de bains liquides à des températures de plus en plus basses. M. Onnes procéda méthodiquement, en suivant une méthode de cascades successives. On ne peut obtenir d'emblée des températures très basses. Donnons un exemple où l'on y arrive en employant divers bains liquéfiés. Une première chute est obtenue avec un premier gaz liquéfié facile à obtenir; on le refroidit fortement par une évaporation rapide sous l'action d'une pompe. Le bain réfrigérant ainsi produit permet de liquéfier sous une pression de quelques atmosphères un second gaz à température critique plus basse. L'ébullition rapide de ce second gaz liquéfié fournit une nouvelle chute de température. On procède encore à une troisième chute de température obtenue dans des conditions analogues.

Dans les cascades du genre de celles que nous venons de dire, on doit s'arranger de manière que les vapeurs résultant de l'ébullition des liquides ne soient pas perdues. On établit à cet effet une circulation continue de chacun des liquides, les vapeurs produites par l'ébullition étant aspirées par une pompe et comprimées jusqu'à leur retour à l'état liquide; chacun des corps de la cascade parcourt un cycle fermé d'opérations; les diverses chutes de température, et en particulier la dernière, peuvent grâce au fonctionnement régulier des pompes, être maintenues aussi longtemps qu'on voudra.

M. Onnes a employé d'abord dans son laboratoire trois chutes fournies par le chlorure de méthyle (CH_3Cl), l'éthylène (C_2H_4), l'oxygène (O_2). Pour ces trois corps, on peut obtenir la liquéfaction par refroidissement et compression. Il n'en fut plus de même quand M. Onnes chercha à liquéfier l'hydrogène. Il dut alors recourir à la compression et à la détente. Pour l'hydrogène, le point que nous avons appelé *point de Joule-Thomson*, c'est-à-dire la température au-dessous de laquelle la détente du gaz préalablement comprimé se fait avec abaissement de température, est un peu supérieur à -200°C . Or l'emploi des trois cycles précédents permet de descendre à cette

température. M. Kamerlingh Onnes put alors liquéfier l'hydrogène ; la température critique de ce gaz est -240°C .

En vue d'expériences diverses, on conservait souvent au Laboratoire de Leyde des bains d'hydrogène liquide dans des cryostats, qui sont des vases de Dewar à double paroi protégeant contre le réchauffement. « Ces bains », nous dit notre Correspondant M. Mathias qui a fait de beaux travaux à Leyde, « sont d'une manipulation délicate et peuvent donner lieu à des explosions redoutables. Plusieurs des laboratoires qui les ont employés ont sauté. A Leyde, une prudence extrême s'allie à une technique expérimentale parfaite ».

L'hydrogène peut aussi être solidifié, en abaissant notablement la pression extérieure sur un bain d'hydrogène liquide, ce qui a donné une température d'environ -259°C . L'hydrogène solide forme une masse transparente vitreuse, et n'a pas l'aspect métallique.

Kamerlingh Onnes était arrivé au cycle correspondant à la liquéfaction de l'hydrogène, après avoir organisé méthodiquement les trois cycles à chlorure d'éthyle, à éthylène et à oxygène, dont nous avons parlé plus haut. En ce qui concerne la liquéfaction de l'hydrogène, il avait été devancé par l'éminent physicien anglais Dewar, qui avait utilisé la compression de l'air et sa détente dans des conditions convenables. Pour ces coûteuses expériences, Dewar avait disposé de revenus considérables laissés par une personne pieuse désireuse de favoriser des recherches ayant pour but d'inspirer à l'homme l'admiration du Créateur. Avec un large éclectisme, les curateurs du fonds envisagé avaient estimé que la liquéfaction des gaz remplissait bien le programme proposé, et c'est ce qui permit à Dewar de devancer Kamerlingh Onnes dans la liquéfaction et la solidification de l'hydrogène.

V.

Kamerlingh Onnes allait prendre, dans ces pacifiques tournois scientifiques, une éclatante revanche en liquéfiant l'hélium, et en utilisant dans des recherches variées les très basses températures auxquelles conduit cette liquéfaction.

Rappelons sommairement l'histoire antérieure de l'hélium qui est, après l'hydrogène, le plus léger des gaz connus. Il semble bien que l'astronome français Janssen fut le premier à signaler, en 1868, dans le spectre solaire une raie jaune brillante, que l'astronome anglais Lockyer attribua à la présence dans le Soleil d'un nouvel élément, qu'il appela *hélium*. La découverte du gaz hélium à la surface de la terre se rattache à l'étude des gaz s'échappant des minerais uranifères. Sir William Ramsay, faisant agir l'acide sulfurique bouillant sur un minéral uranifère, la *clévéite*, minéral norvégien découvert par Nordenskiöld, un gaz s'échappa qui, après avoir été débarrassé de gaz connus, donna un spectre présentant la ligne jaune brillante observée seulement jusqu'ici par Janssen dans le spectre de la chromosphère solaire. Ce gaz a une densité double de celle de l'hydrogène. Il est monoatomique, et sa masse atomique est par conséquent égale à 4 puisque l'hydrogène est diatomique. Le nouveau gaz vient le second dans la classification de Mendeleef, immédiatement après l'hydrogène.

L'hélium se combine très difficilement à d'autres gaz. De plus, n'étant pas inflammable et étant très léger, il est certainement appelé à jouer un rôle important dans le gonflement des ballons. Nos sources d'eaux minérales en émettent de petites quantités. Jusqu'ici c'est à Bourbon-Lancy qu'on en trouve dans notre pays la plus grande quantité; une des sources de cette station donne par an dix mille litres d'hélium. Mais ce sont les sources des États-Unis d'Amérique qui en fournissent actuellement la plus grande quantité; ce pays garde d'ailleurs le précieux gaz avec un soin jaloux.

Mais revenons à Kamerlingh Onnes et à ses travaux sur l'hélium. Continuant l'étude des différents cycles dont nous avons parlé, notre ancien Confrère réussit en 1908 à liquéfier l'hélium, dont la température critique est de -268° C. Ce gaz fortement comprimé est refroidi à -258° C. par l'hydrogène bouillant sous pression réduite; puis il est détendu, ce qui amène la liquéfaction. A la pression atmosphérique, la température d'ébullition de l'hélium liquide est $-268^{\circ},7$ C.

En abaissant la pression à 3^{mm} de mercure, on obtient une température de 1°,6 K. En abaissant la pression à 13 millièmes de millimètre de mercure, la température s'abaisse à 0°,9 K ; nous sommes ici dans la course au zéro absolu.

La liquéfaction de l'hélium, le 10 juillet 1908, est restée mémorable dans l'histoire du Laboratoire cryogène de Leyde. Kamerlingh Onnes a écrit à ce sujet : « Cet essai effleurait les limites du possible. Il a commencé à 6^h du matin et était terminé à 9^h30 du soir. A 6^h30 du soir, quand nous avons vu pour la première fois l'hélium liquéfié, chacun de nous était à bout de forces. . . . Quand ce liquide presque immatériel s'est montré, ce fut un spectacle merveilleux. Nous ne nous en sommes pas aperçu dès le début ; nous n'avons constaté sa présence qu'au moment où le verre se remplissait. Sa surface se détachait du verre nettement comme un couteau ».

Une fois en possession de l'hélium liquide conservé dans des cryostats, Kamerlingh Onnes put faire des expériences variées et du plus haut intérêt. Différents corps subissent à une température convenable un changement d'état dont les caractères les plus apparents sont souvent des variations extrêmement rapides de la densité ou de la chaleur spécifique. Un exemple très intéressant d'un tel phénomène est fourni par l'hélium liquide. Kamerlingh Onnes, mesurant en 1911 la densité de l'hélium liquide, avait conclu que cette densité semblait avoir un maximum. Étudiant un peu plus tard la densité de l'hélium liquide sous la pression de sa vapeur saturée, il démontra que la température de ce maximum était de 2°,19 K. Une découverte tout à fait inattendue fut ensuite celle de deux sortes d'hélium liquide ; on y fut conduit en constatant une discontinuité dans le coefficient diélectrique de l'hélium liquide au passage par la température de 2°,19 K. Il y a une forme stable d'hélium liquide aux températures inférieures à 2°,19K dénommée He_{II} et une autre He_I aux températures supérieures. La transformation de He_I en He_{II} se fait avec dilatation, comme la congélation de l'eau.

Nous avons indiqué précédemment les très basses températures

obtenues par M. Kamerlingh Onnes. Il devait nécessairement se demander si l'hélium pouvait être obtenu à l'état solide. On lit, à ce sujet, dans son discours prononcé devant l'Académie des Sciences de Stockholm en 1913, quand il reçut le prix Nobel : « Naturellement la question s'est posée si l'hélium peut exister à l'état solide. Un essai consistant à abaisser la température de l'hélium liquide par vaporisation sans apport de chaleur n'a pas atteint le but visé, mais a permis d'atteindre les températures les plus basses obtenues jusqu'à ce jour ». Et notre Confrère entrait dans des détails sur la disposition du liquéfacteur et des divers vases contenant l'hélium liquide et l'hélium vaporisé. On frémit en pensant à des manipulations qui se font à des températures un peu inférieures à 1° K. En fait, la plus basse température obtenue par Onnes a été de 0°,9 K. Indiquant ce résultat dans une conférence faite en 1922 sur les très basses températures, il disait de la congélation de l'hélium : « C'est un problème qui exigera de nouvelles installations, et j'ai préféré m'attaquer à d'autres problèmes plus pressants qui pouvaient être abordés à l'aide d'un matériel facilement utilisable ».

C'est seulement le 5 juillet 1926 que l'hélium fut solidifié par M. Keesom, cinq mois après la mort du fondateur du Laboratoire de Leyde. Il avait fallu comprimer fortement le gaz.

VI.

Une découverte d'une très grande importance de Kamerlingh Onnes est relative à l'état *supraconducteur* des métaux. Elle fut faite en 1911. On avait étudié depuis longtemps la variation de la résistance électrique des métaux avec la température. Cette résistance est en général une fonction linéaire de la température, quand celle-ci est suffisamment élevée, et diminue avec elle. Les choses sont plus compliquées aux températures suffisamment basses, par exemple aux températures que l'on était amené à envisager après la liquéfaction de l'hélium. Or, Lord Kelvin avait, en 1902, conclu d'une théorie des électrons que la résistance au zéro absolu devait être infiniment grande. On pouvait

donc s'attendre à un minimum de résistance aux très basses températures. Kamerlingh Onnes commença ses recherches aux températures de l'hélium liquide avec un fil de platine de $0^{\text{mm}},1$ de diamètre enroulé sur un petit tube de verre; dans le domaine envisagé de température, on trouva une résistance très faible et sensiblement constante. On pouvait craindre que ce résultat tint à des impuretés du métal employé.

Pour avoir un métal très pur, Onnes recourut au mercure et se servit d'un tube très fin dans lequel se trouvait du mercure très pur. Dans une de ses expériences, la résistance était de l'ordre de 170 ohms à 0° C. La température diminuant, on pensait atteindre, d'après ce que nous avons dit plus haut, un minimum. Il n'en fut rien, et à la température de $4^{\circ},2$ K, la résistance tomba brusquement d'une valeur mesurable à une valeur pratiquement nulle. Des circonstances analogues se présentèrent pour d'autres métaux comme le plomb et le thallium.

Avec un circuit fermé refroidi, Kamerlingh Onnes put faire une très curieuse expérience. Dans un tel circuit amené à une température convenable, on produit un courant d'induction. Comme la résistance électrique est pratiquement nulle, le courant induit demeure constant, et cela peut durer indéfiniment, c'est-à-dire très longtemps, bien entendu, tant que la température est suffisamment basse. Voilà un courant électrique permanent qui ne coûte pas cher, mais il a fallu obtenir les températures nécessaires, ce qui ne coûte pas bon marché. Cette curieuse expérience a beaucoup frappé les physiciens qui sont venus la voir à Leyde.

Quelques explications théoriques furent suggérées. Dans une telle expérience, d'après la théorie électromagnétique, le temps de *relaxation*, c'est-à-dire le temps au bout duquel l'intensité du courant devient égale à la fraction $\frac{1}{e}$ de sa valeur initiale (e est la base des logarithmes népériens), est égal à $\frac{L}{r}$ (en désignant par L le coefficient de self-induction et par r la résistance). Pour un fil supra-conducteur, r étant très petit, le temps sera très grand.

Kamerlingh Onnes appelait courants d'Ampère les courants induits persistants. C'était un hommage rendu au grand physicien pour son hypothèse d'après laquelle l'aimantation dans un corps aimanté est due au grand nombre de petits courants circulant sans résistance autour des molécules et que l'aimantation a pour objet de rendre parallèles.

Kamerlingh Onnes a beaucoup varié ses expériences sur la supra-conductibilité. En voici une importante. Soit un fil, en état de supra-conductibilité, traversé par un courant. Lorsqu'on augmente l'intensité du courant afin de voir s'il y aura un dégagement de chaleur, on constate qu'il y a une valeur limite de l'intensité, sorte de valeur-*seuil* qu'on ne peut dépasser. Au-dessous de cette valeur-seuil, il n'y a dans le fil aucun dégagement de chaleur (ou aucune résistance); mais, dès qu'on est au-dessus de la valeur-seuil, il y a dégagement de chaleur, et le fil n'est plus supra-conducteur. Ainsi, *pour un fil donné et à une température donnée, il existe une intensité de courant limite déterminée pour laquelle cesse la supra-conductibilité. Au-dessous de cette limite il ne se produit aucun échauffement* (1). Dans certaines expériences, on a pu faire passer un courant de 1200 ampères par millimètre carré de section, sans qu'il y ait dégagement de chaleur. De plus, on a observé que *l'intensité limite du courant est d'autant plus grande que la température est plus basse. Autre fait observé : plus intense est le courant qui passe dans le fil, plus basse est la température de chute.*

Les autres métaux observés par Kamerlingh Onnes au point de vue qui nous occupe sont le plomb, le radium G, son isotope, le thallium et l'étain.

On s'est demandé ce qui se passe dans un métal amené à l'état de supra-conductibilité. L'idée avait été émise qu'il y avait un changement de structure intérieure, c'est-à-dire passage d'une phase à une autre. Dans cet ordre d'idées, M. Keesom a soumis le plomb à une

(1) Il est bien entendu que, dans tout ce qui précède, résistance nulle et résistance extrêmement petite non mesurable ont la même signification.

étude par les rayons X, et la conclusion a été que le plomb reste le même à la température de l'hélium liquide qu'à la température de l'hydrogène liquide, et son réseau est identique à celui du plomb à la température ordinaire. D'autres tentatives ont été faites pour expliquer les phénomènes relatifs aux supra-conducteurs, en recourant à la théorie des quanta.

Disons aussi un mot de l'influence du champ magnétique sur les supra-conducteurs. Dès 1912, Kamerlingh Onnes mesurait la résistance électrique des métaux dans un champ magnétique aux basses températures. On peut parler, pour une température donnée et pour un fil métallique donné, d'une *valeur-seuil* du champ magnétique. Ainsi, pour un accroissement progressif du champ magnétique, on observait une augmentation subite de la résistance, c'est-à-dire la disparition de la supra-conductibilité. En augmentant l'intensité du champ magnétique, la résistance continue à augmenter. Beaucoup d'autres expériences ont été faites dans le même ordre d'idées.

Nous avons dit l'œuvre admirable de Kamerlingh Onnes. La liquéfaction de l'hélium lui a permis, comme on l'a vu, d'obtenir des résultats extrêmement importants, parmi lesquels une température inférieure à 1° K et une découverte particulièrement brillante fut celle de la supra-conductibilité électrique de certains métaux aux très basses températures.

En même temps qu'un chercheur hors ligne, Kamerlingh Onnes s'est révélé comme un organisateur de premier ordre. Le Laboratoire cryogène de Leyde, destiné à l'étude des corps aux basses températures a servi de modèle à des laboratoires créés ailleurs dans des buts similaires. Toute l'organisation a été étudiée à Leyde dans les moindres détails, et peut-être ne convient-il pas de parler de détails dans une organisation qui a pour but de rendre possibles des recherches souvent très délicates et parfois dangereuses. Il reste vrai que, dans certaines études scientifiques, le génie est une longue patience.

Ayant atteint à 70 ans l'âge de la retraite, Kamerlingh Onnes abandonna la direction du laboratoire qu'il avait fondé. Il eut pour

successeurs deux de ses élèves les plus distingués, le professeur de Haas et le professeur Keesom, qui se partagèrent la direction des différents services.

L'état des branches de Kamerling Onnes laissait depuis longtemps à désirer. A partir de 1924, il ne quittait plus guère pendant l'hiver son cabinet de travail dans la villa qu'il s'était fait construire, renseigné cependant par le téléphone sur les travaux du laboratoire et continuant à conseiller ses anciens collaborateurs et ses élèves. Dans le milieu du mois de février 1926, une grippe infectieuse se déclara subitement, et le 21 de ce même mois, l'illustre savant expirait au milieu des siens. Son nom reste à jamais inscrit dans un chapitre important de l'histoire de la Physique. Kamerlingh Onnes avait été élu Associé étranger de notre Académie, le 7 décembre 1925.

VII.

Je m'arrêterai un moment sur quelques travaux effectués à Leyde, par les élèves et les collaborateurs du fondateur du Laboratoire.

Sans y insister, j'indique seulement que l'on n'y emploie plus guère aujourd'hui le cycle à cascades dont nous avons parlé. On use le plus souvent de fortes compressions et de détentes, et l'on prépare à une échelle presque industrielle l'air liquide et l'hydrogène liquide.

Nous avons dit que, en 1922, la température minima obtenue par Kamerlingh Onnes avait été un peu inférieure à 1° K. Dans cette course vers le zéro absolu, différents progrès furent faits en usant de l'ébullition de l'hélium liquide sous pression réduite, et l'on arriva ainsi à 0°,71 K, mais il semblait bien que dans cette voie on ne pouvait guère aller plus loin. Pour obtenir des températures plus basses, on utilisa le phénomène de la *démagnétisation adiabatique*. Notre Confrère M. Langevin avait montré depuis longtemps (1904), par des considérations théoriques, la possibilité d'un refroidissement par une soudaine démagnétisation dans des conditions convenables. Appliquons cette remarque générale au cas suivant : soit un sel para-

magnétique placé dans une enceinte refroidie par de l'hélium liquide. On produit un champ magnétique; le sel s'aimante et de l'énergie thermique apparaît qui se dissipe à travers l'hélium liquide. On isole ensuite thermiquement le sel du bain d'hélium, ce qui peut se faire en suspendant le sel paramagnétique dans un récipient plongé dans de l'hélium liquide, récipient d'abord plein d'hélium gazeux, où l'on fait le vide au moment de la désaimantation. Quand on supprime le champ magnétique, le sel se désaimante et subit un abaissement de température. On peut en donner sommairement la raison, en disant que, si l'on voulait maintenir sa température constante, il faudrait fournir une quantité d'énergie égale à celle qui a apparue sous forme de chaleur pendant l'aimantation.

La méthode précédente fut d'abord appliquée en 1933-1934 par M. de Haas au laboratoire de Leyde, en employant certains sels de cérium. La plus basse température qu'il obtint alors fut $0^{\circ},08$ K. Notre éminent Correspondant, qui fut un des premiers pionniers dans la course aux températures extrêmement basses au moyen des phénomènes magnétiques, a utilisé ensuite pour cet objet l'alun de chrome et l'alun de titane et obtenu des températures inférieures à $0^{\circ},005$ K. Il semble que, en 1938, la température de $0^{\circ},003$ K a été obtenue (1).

Des travaux extrêmement variés ont été faits à Leyde. Imitant ce qui avait été réalisé au moyen de l'air liquide pour obtenir divers gaz de l'atmosphère, on a pu séparer les isotopes 20 et 22 du néon par une distillation fractionnée du néon liquide. Appliqué à l'hydrogène, le même procédé a donné un résultat très important, je veux dire la séparation partielle de l'hydrogène lourd.

Non moins curieux ont été les résultats obtenus par l'étude de la structure des solides aux basses températures au moyen des rayons X. On obtient à l'état de cristaux des corps gazeux à la température ordinaire, tels que l'éthylène et l'azote.

(1) Il est important de remarquer que la température dans le cas des très grands froids ne peut être mesurée par la pression d'un gaz, qui serait beaucoup trop faible. Il faut passer par l'intermédiaire de la susceptibilité magnétique du sel.

De nombreux savants, étrangers à la Hollande, vinrent travailler au laboratoire de Kamerlingh Onnes, où ils recevaient la plus cordiale hospitalité. Je rappellerai quelques-uns d'entre eux.

M^{me} Curie a vérifié à Leyde que la radioactivité du radium ne changeait pas quand on le refroidissait à la température de l'hydrogène liquide. M. Mathias, avec M. Crommelin, a étudié le diamètre rectiligne de nombreux gaz, dont, en dernier lieu, le krypton et l'oxyde de carbone. On doit rappeler aussi que M. Pierre Weiss a étudié, avec M. Kamerlingh Onnes, l'aimantation à saturation des corps ferromagnétiques, ce qui le conduisit plus tard à la découverte du magnéton. M. Jean Becquerel a étudié avec grand soin les spectres d'absorption des terres rares et leur décomposition par un champ magnétique; puis il a découvert la polarisation rotatoire paramagnétique. Avec M. de Haas, il a précisé dans certains cristaux la loi de la rotation paramagnétique suivant la direction de l'axe optique, loi variant d'ailleurs avec la famille de cristaux étudiés.

Les travaux exécutés au Laboratoire de Leyde forment une véritable bibliothèque, et l'on ne saurait trop louer l'intérêt et la variété des recherches entreprises. Kamerlingh Onnes ne s'était pas trompé en supposant que l'étude des basses températures serait extrêmement féconde et révélerait de nombreux faits nouveaux; elle est loin d'être épuisée.

VIII.

Je termine par une dernière application en parlant de la vie aux basses températures. Depuis longtemps, des biologistes se sont intéressés à la question de la suspension expérimentale de la vie, particulièrement à propos de la découverte des animaux reviviscents, tels que anguillules du blé, tardigrades et rotifères des mousses; ces animaux paraissent avoir le pouvoir de ressusciter. On discute encore sur la distinction à faire entre l'état de vie suspendue et l'état de vie ralentie. Bornons-nous ici à quelques expériences précises de M. Paul Becquerel faites sur diverses graines.

M. Paul Becquerel, se servant de baryte caustique, dessèche progressivement dans l'air sec un lot de graines semblables. Au bout de 2 mois, on vérifie le pouvoir germinatif de quelques-unes d'entre elles, puis on place les autres dans des petits tubes de verre où l'on réalise le vide à l'aide d'une pompe rotative donnant un dix-millième de millimètre de mercure. Le vide est ensuite achevé par une pompe de Langmuir jusqu'à ce que la pression de l'air restant ne soit plus mesurable à la jauge Dunoyer, ce qui indique une pression inférieure à un cent-millième de millimètre de mercure. Les tubes fermés à la lampe sont ensuite plongés pendant 7 heures dans de l'hélium liquide à la température de -271° C. Après ce traitement, les graines ramenées à la température ordinaire germèrent très bien. De ces expériences il résulte que, dans un vide qui a duré 4 mois et à la très basse température de -271° C, le pouvoir germinatif des graines utilisées n'a pas été diminué. Ainsi le protoplasma des graines, dans des conditions exceptionnelles paraissant incompatibles avec la vie, conserve, peut-on dire, sa puissance de revivre. Sommes-nous là, se demande M. Paul Becquerel, en présence d'une véritable *vie suspendue*, ou d'une *vie à respiration intra-cellulaire anaérobie extrêmement ralentie* ? Hésitant entre ces deux alternatives, M. Becquerel consulta à ce sujet notre ancien Confrère Albert Dastre, qui lui répondit : « Dans le cas très spécial où vous avez placé vos graines et qui ne se trouve pas réalisé dans la nature, vous avez privé vos graines d'eau et de gaz, desséché leurs diastases, solidifié le protoplasma et par conséquent supprimé momentanément leur état colloïdal. Or, sans état colloïdal, la vie ne nous paraît pas possible. Il est bien vraisemblable que vous avez ainsi réalisé la véritable vie latente telle que la concevait Claude Bernard ». Je me permettrai d'ajouter que, à notre époque, où l'on parle beaucoup de ce qui est et de ce qui n'est pas à notre échelle, il est peut-être permis de dire, en se plaçant à notre échelle, que la vie a été suspendue dans les expériences décrites plus haut.

On a expliqué d'une manière analogue le fait que diverses plantes

peuvent résister à des froids très rigoureux, passant l'hiver au sommet de montagnes élevées ou dans des contrées glacées, comme la région de Verchojansk en Sibérie, où la température oscille pendant 6 mois entre -30° C. et -71° C.

Dans le même ordre d'idées, on a aussi discuté la théorie de la panspermie d'Arrhenius, relative à la vie qui pourrait passer d'un astre à un autre dans les espaces célestes. L'éminent physicien admettait que, dans ces espaces où la température est très basse, les germes qui s'y trouvent se déshydratent et se refroidissent, en conservant cependant, d'après les expériences de Paul Becquerel, une vie ralentie ou suspendue; il en concluait que la vie peut passer d'un astre à un autre. Mais, comme l'a montré M. Becquerel, les rayons ultraviolets de la lumière tuent les germes, et il en résulte que la théorie de la panspermie ne peut être admise, au moins dans les conditions envisagées par le physicien suédois.

Je n'insisterai pas davantage. On peut penser que, comme les physiciens et les chimistes, les biologistes trouveront à utiliser l'arme puissante que Kamerlingh Onnes a mise entre les mains des savants, en leur permettant, avec l'hélium liquide, d'expérimenter à des températures extrêmement basses.

(Extrait des *Mémoires de l'Académie des Sciences*, t. 63.)

