

PHYSIQUE DES BASSES TEMPÉRATURES. — *Flux critiques dans des canaux verticaux ouverts remplis d'hélium superfluide sous pression.*  
Note (\*) de MM. **GÉRARD CLAUDET** et **LUCIEN SENET**, transmise par M. Louis Néel.

Des mesures d'échanges thermiques effectuées dans des canaux verticaux ouverts remplis d'hélium superfluide sous pression font apparaître deux régimes d'écoulement de chaleur distincts. On donne de ce résultat une interprétation basée sur l'existence de deux flux de chaleur critiques.

Des mesures comparatives des échanges thermiques ont été effectuées avec un même échantillon immergé dans l'hélium normal, dans l'hélium superfluide saturé et dans l'hélium superfluide sous pression à diverses températures et diverses pressions.

L'échantillon, représentatif d'un canal de refroidissement est constitué d'un tube en acier inoxydable de diamètres intérieur et extérieur 1,3 et 1,5 mm et de 10 cm de hauteur, chauffé uniformément par un courant électrique dont on mesure l'intensité et la tension. Un isolant thermique (Stycast 2 850 FT) enveloppe extérieurement le tube. L'ensemble est immergé verticalement dans un bain d'hélium dont la pression et la température peuvent être imposées séparément.

La chaleur est évacuée par l'intérieur du tube chauffant dont on mesure l'élévation de température par rapport à celle du bain réfrigérant à l'aide de trois thermocouples différentiels (Au-Fe 0,3 %; chromel) placés extérieurement au tube à 1/4, 1/2 et 3/4 de sa hauteur.

On a obtenu la température de la paroi interne du tube en corrigeant la valeur mesurée de l'écart de température calculé dans l'épaisseur de ce tube.

On a vérifié que le flux de fuite de chaleur à travers l'isolant était négligeable.

Les résultats sont donnés sous forme de courbes qui représentent la température de la paroi interne du tube en fonction de la puissance totale dissipée.

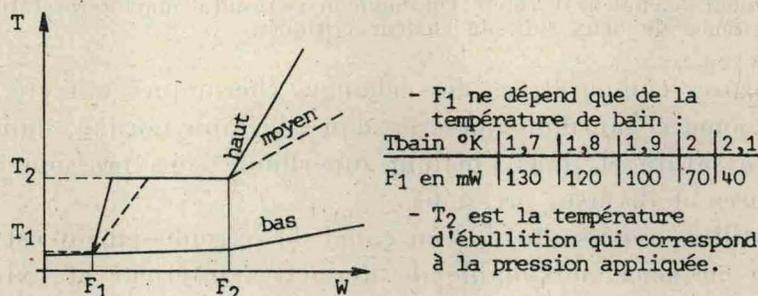
La mesure effectuée à 4,2 K donne des résultats (flux critique de 0,12 W/cm<sup>2</sup>) en bon accord avec ceux obtenus par Lehongre et coll. (1) pour une même géométrie et la même température.

HÉLIUM SUPERFLUIDE SOUS PRESSION. — Nous avons recherché l'influence des paramètres que constituent la température du bain (1,7 à 2,17 K) et la pression appliquée (de la pression de vapeur à 3,5 atm).

Dans tous les cas, les courbes obtenues, schématisées sur la figure, font apparaître une même particularité :

les échanges thermiques ont lieu selon deux régimes distincts qui amènent à définir deux valeurs de flux de chaleur critiques notés  $F_1$  et  $F_2$ .

Pour de faibles puissances et avant l'apparition du premier flux critique le transfert de chaleur s'effectue dans l'hélium superfluide sans gradient de température, donc sans transfert de masse. Il s'agit du régime d'écoulement de Gorter-Mellinck, étudié dans des capillaires ou canaux, en hélium superfluide saturé, par Bertman et Kitchens (<sup>2</sup>), Passow (<sup>3</sup>), Chapmann et coll. (<sup>4</sup>) et en hélium superfluide sous pression par Linnet et Frederking (<sup>5</sup>) et par Kraft (<sup>6</sup>).



Hélium superfluide sous pression.

Tous ces auteurs obtiennent vers 1,8 et 1,9 K des flux critiques compris entre 1 et 3 W par centimètre carré de section de la colonne liquide indépendamment de la géométrie du canal, de la pression appliquée au bain et du mode de chauffage (localisé ou réparti).

Dans notre cas, indépendamment de la pression, le premier flux critique apparaît à 3,7 W/cm<sup>2</sup> pour un bain à 1,85 K.

Ce premier flux diminue quand la température du bain augmente, on vérifie ainsi qu'il dépend de la densité en atomes superfluides du modèle à deux fluides.

Quand le flux de chaleur à évacuer dépasse le premier flux critique, un gradient de température apparaît dans l'hélium qui remplit le tube. Le liquide s'échauffant voit ses capacités de transport diminuer, il ne cesse de s'échauffer que lorsqu'il a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression appliquée au bain [ou une température légè-

rement supérieure si, comme Kraft <sup>(6)</sup>, on tient compte du retard à la nucléation].

On obtient alors un nouveau régime stable caractérisé dans le tube chauffant par l'évaporation de l'hélium saturé à une température constante. Un mouvement de convection s'établit et permet l'augmentation du flux de chaleur jusqu'à un deuxième flux critique pour lequel le volume des vapeurs produites devient trop important.

Ce deuxième flux critique dépend à la fois de la pression et de la température du bain, car il est fonction des différences de densité et des différences d'enthalpie entre le gaz qui s'échappe et le liquide qui le remplace ainsi que de la chaleur de vaporisation du liquide saturé.

Aucun des deux flux critiques que nous avons détectés n'augmente régulièrement avec la pressurisation du bain comme c'est le cas dans les expériences de Roubeau <sup>[(7), (8)]</sup>, effectuées jusqu'à des écarts de température éventuellement importants et qui ne peuvent être directement comparées aux nôtres.

Dans les expériences où une surface convexe (fil, cylindre ou plan) est immergée dans un bain superfluide, les mouvements de convection peuvent s'établir beaucoup plus librement que dans des canaux et conduire, malgré de faibles différences de densité, à des valeurs importantes du deuxième flux critique. On pourrait de cette façon comprendre les résultats obtenus par Goodling et Irely <sup>(9)</sup> par Chapmann <sup>(10)</sup> et par Lemieux et Léonard <sup>(11)</sup> qui observent une forte influence de la profondeur d'immersion : vers 1,8 K le flux critique peut être multiplié par 3 ou 4 quand la profondeur d'immersion augmente de quelques centimètres à 50 cm par exemple.

Dans ce dernier cas, la surpression appliquée au voisinage de l'échantillon est de l'ordre de 5 mm de mercure et le liquide peut s'échauffer de 0,1 K avant de bouillir (dans l'hélium normal à 4,2 K la même surpression ne permettrait qu'un gradient de 0,01 K).

CONCLUSION. — Les échanges thermiques entre un solide et l'hélium superfluide sont essentiellement liés aux propriétés de transport de la chaleur dans le fluide lui-même.

— L'hélium superfluide sous pression donne lieu à deux flux de chaleur critiques qui apparaissent à des niveaux de température différents.

— Ces deux niveaux de température peuvent être très voisins, donc difficilement discernables expérimentalement, quand la surpression est faible (pression hydrostatique) ou quand la géométrie étudiée permet d'intenses mouvements de convection.

— Pour le refroidissement d'ensembles supraconducteurs vers 2 K, on pourra préférer l'hélium superfluide sous pression, à l'hélium super-

fluide saturé pour sa facilité de mise en œuvre ou son comportement diélectrique mais sans obtenir d'amélioration des échanges thermiques.

M. P. Roubeau a eu avec nous de nombreuses et fructueuses discussions sur ce sujet.

(\*) Séance du 6 novembre 1972.

(<sup>1</sup>) S. LEHONGRE et coll., *Proceedings I. C. E. C.* 2, Brighton, 1968, p. 274-275.

(<sup>2</sup>) B. BERTMAN et T. A. KITCHENS, *Cryogenics*, février 1968, p. 36-41.

(<sup>3</sup>) C. H. PASSOW et coll., *Cryogenics*, avril 1971, p. 143-145.

(<sup>4</sup>) R. C. CHAPMAN et coll., *Adv. Cryog. Eng.*, 15, 1969, p. 290-298.

(<sup>5</sup>) C. LINNET et T. H. K. FREDERKING, Papier 1.34, 13<sup>e</sup> Congrès I. I. F., Washington, 1971.

(<sup>6</sup>) G. KRAFT, Preprint I. C. E. C. 4, Eindhoven, 1972.

(<sup>7</sup>) P. ROUBEAU, *Comptes rendus*, 273, série B, 1971, p. 581-.

(<sup>8</sup>) P. ROUBEAU, Communication privée.

(<sup>9</sup>) J. S. GOODLING et R. K. IREY, *Adv. Cryog. Eng.*, 14, 1968, p. 159-169.

(<sup>10</sup>) R. C. CHAPMAN, *J. L. T. P.*, 4, n<sup>o</sup> 5, 1971, p. 485-488.

(<sup>11</sup>) G. P. LEMIEUX et A. C. LEONARD, *Adv. Cryog. Eng.*, 13, 1967, p. 624-631.

Service des Basses Températures,  
Centre d'Études Nucléaires  
de Grenoble,  
Cedex n<sup>o</sup> 85,  
38041 Grenoble,  
Isère.