

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.

Mathematisk-fysiske Meddelelser. **XI**, 2.

MANOMÈTRE

A CONTACT OPTIQUE ET SON EMPLOI
POUR LA DÉTERMINATION DU TRIPLE
POINT DE L'EAU

PAR

K. PRYTZ



KØBENHAVN

HOVEDKOMMISSIONÆR: ANDR. FRED. HØST & SØN, KGL. HOF-BOGHANDEL

BIANCO LUNOS BOGTRYKKERI A/S

1931

AVANT-PROPOS

Le traité¹ décrit un manomètre à mercure, fondé sur l'ajustage par contact optique. Ce contact est établi à l'aide de microscopes d'une construction spéciale dans lesquels il a été placé dans le plan d'image de l'oculaire une face luisante avec des traits noirs. La mise au point à l'image réflétée de ces traits dans la surface de mercure forme le »contact optique« et peut s'effectuer avec une exactitude d'une fraction de μ (Sur l'exactitude du manomètre, voir page 26 et 31).

Le manomètre est employé pour la détermination de la pression de la vapeur au triple point de l'eau. Cette pression est trouvée égale à 4,5867 mm de mercure. L'auteur

¹ Le manuscrit de ce traité a été découvert parmi les papiers de K. PRYTZ après sa mort le 4 mars 1929. C'est le compte rendu d'une conférence, faite dans la »Kongelige Danske Videnskabernes Selskab« (L'Académie royale des Sciences et des Lettres de Danemark) le 11 Mai 1928. Quant à une seule partie, la partie numéro 8, elle a été complétée par un autre manuscrit, élaboré pour une conférence qui a été faite dans la »Fysisk Forening« (La Société de physique) le 21 mai 1928. L'idée d'employer le triple point de l'eau comme un point fixe dans les mesures de la température a été proférée récemment par MM. A. MICHELS et F. COETERIER (Proc. Amsterdam 30, 1017—1020, 1927, et par M. HELMUTH MOSER (Ann. d. Phys. (5) 1, 341—360, 1929).

Il ressort nettement des dates indiquées ci-dessus, ainsi que des méthodes toutes différentes dont on s'est servi, que les expériences de K. PRYTZ sont effectuées tout à fait indépendamment de ces ouvrages.

La publication a été faite par E. S. JOHANSEN.

propose de prendre le triple point comme un point fixe absolu dans les mesures de la température au lieu de partir, comme on le fait actuellement, du zéro à la pression de l'atmosphère méthode qui est entachée de divers défauts, entre autres l'abaissement, démontré antérieurement par l'auteur, à cause d'absorption d'air par l'eau.

LE TRAITÉ SE
DIVISE DANS LES PARTIES SUIVANTES

	Page
1. Description de l'appareil	7
2. Ajustage de la surface de mercure à contact optique avec le microscope. Emploi du manomètre	11
3. Formation d'images dans un microscope à contact optique avec variation de la hauteur de l'oculaire	18
4. Application de la correction pour les hauteurs d'oculaires inexactes	22
5. Détermination de la hauteur de pressions égales, exactitude de la mesure	24
6. Mesure de petites variations de pression seulement par changements des hauteurs des oculaires	28
7. Mesure de pressions assez élevées	31
8. Le triple point de l'eau, pris comme point fixe de température. Mesure de la pression du triple point	34
9. Comparaison du manomètre à contact optique avec d'autres manomètres sensibles	45

1. Description de l'appareil.

Le manomètre se compose, comme le démontre la figure 1, de deux microscopes verticaux F et B , portant chacun un des deux tubes de manomètre f et b avec lesquels ils sont invariablement réunis.

Chacun des microscopes dont la distance mutuelle des axes est de 7,3 cm, est porté par son soutien de laiton qui s'élève sur un plateau de laiton, reposant à son tour sur trois vis calantes. Le microscope F est invariablement réuni avec son soutien, tandis que le microscope B est placé dans un support de microscope ordinaire Zeiss, de sorte qu'on puisse varier sa hauteur à l'aide de deux tambours dont l'un donne un ajustage très exact.

Chacun des deux tubes de verre f et b est mastiqué dans un tube de laiton, qui est fixé par des vis au tube de son microscope.

Chaque microscope est construit, comme il est mentionné avec plus de détails ci-dessous, de façon à constater quand il y a une certaine distance entre la face inférieure de l'objectif et le niveau de mercure dans le tube de manomètre. Il va donc sans dire qu'une mesure de la différence entre deux pressions dont l'une, la plus élevée, est exercée dans f , l'autre dans b , doit se faire en levant le microscope B , jusqu'à ce qu'on ait obtenu ladite distance dans les tubes. Pour permettre que cette distance se produise simultanément

ment dans les deux tubes, il peut être nécessaire d'introduire dans les tubes ou d'en extraire du mercure.

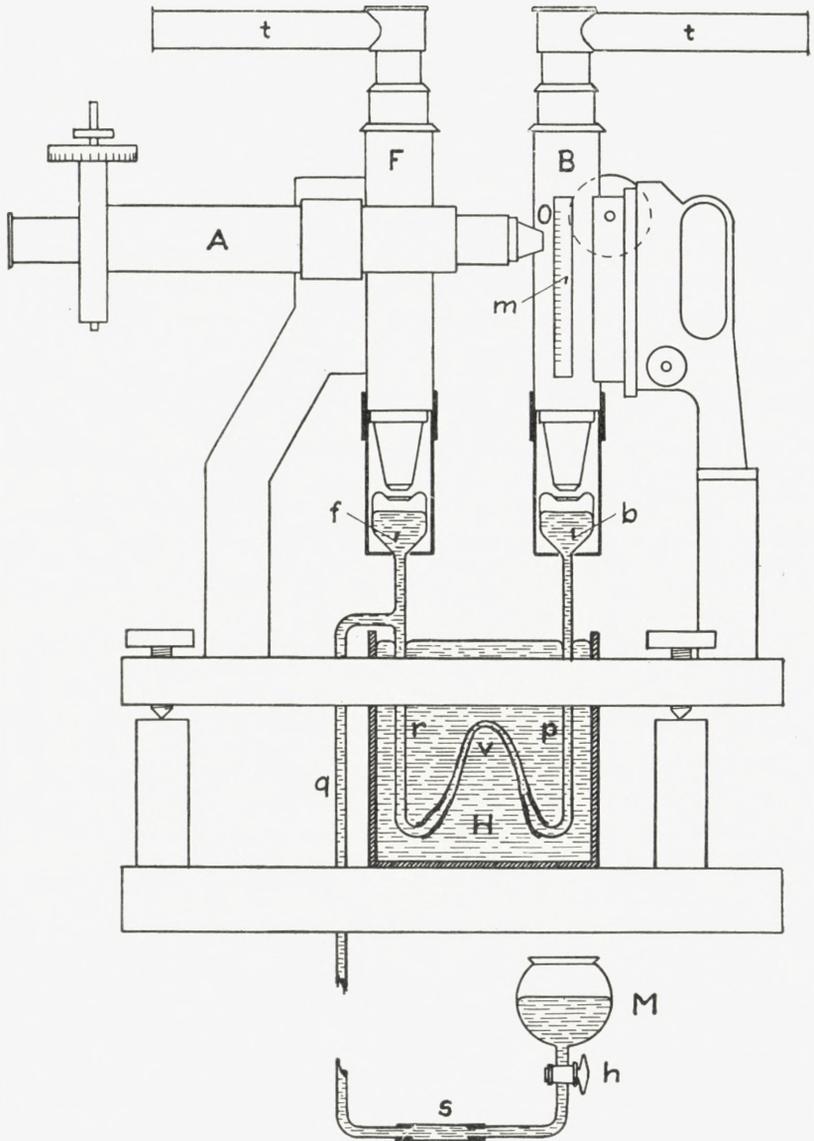


Fig. 1.

La différence de hauteur entre les deux niveaux de mercure peut être mesurée de la manière qu'on place sur le microscope mobile une règle verticale dont on observe

les traits par un microscope-viseur A qui est invariablement réuni avec le microscope F .

Cette disposition présente divers avantages. 1. L'ajustage à la distance constante de l'objectif au niveau de mercure peut s'opérer avec une exactitude d'une fraction de μ . 2. Comme il n'est pas nécessaire que les surfaces soient vues de côté, le manomètre entier peut être protégé efficacement contre les variations de température, éventuellement en le plongeant dans un bain. 3. Quand l'ajustage est terminé il se trouve des espaces d'air constants dans les tubes.

Conformément à ce qui précède, les deux tubes de manomètre ont été construits de la manière suivante. Il faut un conduit souple entre f et b pour permettre d'élever b jusqu'à une hauteur de 4 cm au-dessus de f , ce qui correspond à la différence de pression la plus élevée à laquelle j'ai construit le manomètre. Pour n'être pas obligé d'employer pour cette raison un long tube de verre ou de métal, étroit et à parois minces, dont l'emploi entraîne divers inconvénients, j'ai établi la communication par un petit tube de caoutchouc v , dont le diamètre intérieur est de 1,6 mm environ, et le diamètre extérieur de 6 mm environ, lequel, pour parer à la porosité du caoutchouc, est tout à fait plongé dans le mercure dans un étroit récipient de verre H d'une hauteur de 9,3 cm.

Les tubes de manomètre ont un diamètre de 3 cm environ et sont cylindriques jusqu'à une hauteur de 2 cm environ. Ils se prolongent en descente en tubes de 1,3 mm de diamètre. g , qui est la prolongation de f , a une longueur de 83 cm environ. Il traverse un trou, percé dans la console de pierre qui porte le manomètre, et communique en bas par un tube de caoutchouc s , à parois épaisses, avec un réservoir de mercure M , muni d'un robinet h .

Un peu au-dessus du bord du récipient de verre H le tube q est muni d'un tube r qui descend presque jusqu'au fond de H . Le tube p qui prolonge le tube de manomètre b atteint également presque le fond de H . Les extrémités inférieures des tubes r et p se courbent en haut de sorte que le tube de caoutchouc, qui les réunit, forme un arc dans le mercure.

Au sommet les parois des tubes de manomètre se terminent en fermetures concaves ayant chacune au milieu un trou de 7 mm environ de diamètre. Ce trou est taillé en cône pour qu'on puisse le fermer par le masticage d'une petite lame de verre, plane et également taillée en cône. Des tubes d'un diamètre de 3,2 mm partent en arrière des espaces au-dessus du mercure dans f et b (c'est pourquoi ils ne sont pas figurés). Le tube partant de b se prolonge par un tube de métal d'une longueur de 50 cm qui doit être souple pour permettre la mobilité de b .

Le remplissage de mercure du réservoir M dans les tubes de manomètre se fait comme il suit: on fait le vide dans les deux tubes de manomètre; quand on est presque sûr que le tube de caoutchouc v est tout à fait évacué d'air on remonte M jusqu'à ce qu'une quantité convenable de mercure ait coulé dans les tubes f et b , après quoi l'on tourne le robinet h . On obtient une adaptation plus exacte de la quantité de mercure en serrant plus ou moins le tube de caoutchouc s . L'opération est pratiquée au moyen d'une tige, levée au niveau du bord de la console et manipulée par l'observateur qui applique l'œil à l'un ou l'autre des microscopes.

La règle m est divisée en intervalles de $\frac{1}{5}$ mm; les millimètres entiers sont vérifiés d'après le principe des

interférences, la longueur d'onde de la ligne de mercure verte ayant servie d'unité¹.

La règle est en bronze, et les traits sont tracés sur une bande d'argent incrustée. Elle est fournie par la Société Genevoise d'Instruments de Physique. Le microscope-viseur *A* est muni d'un objectif Zeiss *B* et d'un micromètre avec un fil double et mobile. Le tambour est divisé en 100 intervalles et un tour est à peu près égal à $\frac{1}{10}$ mm sur la règle. La règle est éclairée par une petite lampe à incandescence, placée derrière le manomètre, et dont la lumière est réfléchiée par une lame de verre, placée derrière l'objectif et formant un angle de 45° avec le microscope.

2. Ajustage de la surface de mercure à contact optique avec le microscope. Emploi du manomètre.

Chacun des tubes oculaires des deux microscopes verticaux est muni d'un tube latéral *t* renfermant une petite lampe à incandescence dont la lumière est dirigée par une pointe de verre conique argentée vers la cathète verticale d'un prisme rectangulaire (*p* dans la figure 2), coupé d'une plaque de verre d'une épaisseur de 1 mm, et placé au-dessous de la lentille oculaire. L'hypoténuse du prisme, d'une longueur de 3 mm et tournée en haut vers l'oculaire, est argentée, et sur l'argent ont été tracés trois traits fins, parallèles à l'arête du prisme, après quoi la surface a été enduite de laque noire.

Si la lumière, réfléchiée d'aplomb par le prisme, tombait

¹ K. PRYTZ: Millimètre étalonné par des interférences. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Mathematisk-fysiske Meddelelser IV, 6, 1922 (L'Académie royale des Sciences et des Lettres de Danemark. Publications mathématiques et physiques IV, 6, 1922).

sans obstacles sur l'objectif, celui-ci reproduirait une très petite image réelle de l'hypoténuse avec les trois traits, et si la surface de mercure coïncidait avec l'image, la lumière retournerait simplement par le même chemin après réflexion et aboutirait à la source de lumière; on ne verrait rien par l'oculaire.

Sans doute on pourrait déjà fonder sur ce fait une mise

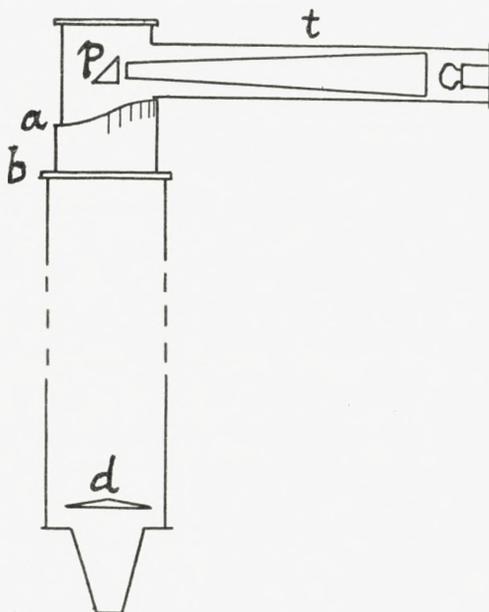


Fig. 2.

au point »à l'obscurité« de la surface de mercure, étant donné qu'une déviation de la hauteur exacte donnerait de la lumière par l'oculaire à côté du prisme, mais on comprend facilement que cette méthode ne serait pas satisfaisante.

Pour pouvoir voir l'image que reproduit l'objectif par la lumière réfléchie, je place au-dessus de l'objectif une plaque de verre d , taillée en double prisme dont l'arête réfringente est perpendiculaire sur l'arête du prisme p (d

fait dans la figure un angle de 90° avec cette position pour être plus visible). Par ce fait on obtient la reproduction de deux images de l'hypoténuse luisante de p , et comme elles sont reproduites chacune de son côté de p ces images sont visibles par l'oculaire; les traits se dessinent noirs sur le fond clair. L'angle réfringent de d est choisi assez petit pour que les deux images se trouvent tout près de p . Si, à l'avance, l'oculaire est ajusté à une vision nette du milieu de l'hypoténuse de p où se trouvent les traits, les images de ceux-ci ne se montrent nettement que quand les deux images, reproduites les premières par l'objectif, coïncident avec la surface de mercure. C'est par conséquent sur ce fait qu'est fondé l'ajustage de la surface de mercure à contact optique.

Il faut remarquer que dans le cas où la hauteur de la surface de mercure fait une déviation de la hauteur de la vision nette, cette déviation donnera une déviation deux fois plus grande de la distance de l'image reflétée à l'objectif. L'exactitude de l'ajustage est donc deux fois plus grande que celle qu'on obtiendrait par observation d'un objet matériel, par exemple un grain de poussière sur le mercure.

L'adaptation exacte de la hauteur de la surface de mercure est constatée, tant en observant les contours des traits qu'en évaluant leur degré d'obscurité. Mais dans le cas présent comme dans beaucoup de cas similaires, il est d'une importance décisive pour obtenir un ajustage exact qu'on puisse produire très vite des déviations de la surface de mercure des deux côtés de la position exacte. Mais on ne peut pas obtenir un bon résultat en élevant et abaissant le niveau de mercure parce que l'établissement de l'équilibre exige trop de temps; il faut se rappeler que

les positions réciproques des tubes du microscope et du manomètre sont invariables. J'ai par conséquent construit l'appareil de telle sorte qu'on puisse élever ou abaisser l'oculaire par rapport à sa position normale, la position de zéro, par un mouvement micrométrique et observer ces modifications de hauteur avec une exactitude de $\frac{1}{50}$ mm. De cette manière on peut constater avec une grande exactitude la mise au point à vision nette. Comme il est mentionné plus bas (page 17) cette disposition contribue beaucoup à faciliter l'emploi du manomètre. Le déplacement susdit de l'oculaire se fait de la manière suivante. Le tube, portant l'oculaire avec son prisme p et le tube d'éclairage (fig. 2), est enveloppé d'un tube très court ab dont le bord inférieur repose sur le rebord formant le sommet du tube du microscope. Le sommet de ce tube ab , contre lequel repose le tube d'éclairage, est taillé en hélice avec un pas de vis de 1 cm. Le long de l'hélice sont tracés des traits dont les intervalles sont égaux à un pas de vis de $\frac{1}{5}$ mm, et une division correspondante est faite sur le tube de l'oculaire. On tourne le tube ab jusqu'à ce qu'on obtienne une vision nette dans le microscope, et puis on cherche le meilleur pointé par de petits mouvements rotatoires d'un côté à l'autre du tube de l'oculaire en se servant du tube d'éclairage à titre de manivelle.

Cette disposition qui fut improvisée après la mise en usage du manomètre doit être remplacée par un mécanisme plus pratique.

[PRYTZ a plus tard réalisé le perfectionnement susmentionné de l'ajustage de l'oculaire de la manière suivante:

Le tube d'oculaire R_1 , portant le tube d'éclairage t , est muni de deux crémaillères T_1 et T_2 . Les roues dentées, y

correspondantes, se tournent autour d'axes, reposant dans un manchon en laiton K qui est fixé sur le tube R_2 , dans lequel glisse le tube d'oculaire R_1 . Il faut naturellement établir des fentes aussi bien dans K que dans R_2 pour permettre le déplacement de T_1 et de T_2 ; c'est pourquoi R_2 ne se voit pas beaucoup dans la coupe ci-dessous. D_1

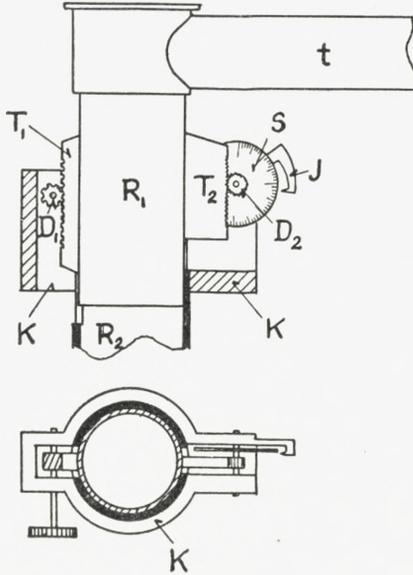


Fig. 2 a.

est un pignon solide, coupé en biais, qui sert à faire monter et descendre le tube d'oculaire. D_2 est un pignon mince n'ayant pour but que de commander la plaque d'aluminium divisée S . A l'aide de l'index J , fixé au manchon K , on peut de cette manière vérifier la hauteur de l'oculaire avec une exactitude de $1/100$ mm.]

Aucune des petites lampes à incandescence, employées pour l'éclairage des microscopes, n'est allumée que pendant le laps de temps qui est nécessaire pour faire les diverses observations. Leur influence sur la température du manomètre est par conséquent minime.

Emploi du manomètre.

Lorsqu'on a terminé la mesure d'une différence de pression exercée dans le manomètre, les deux niveaux de mercure sont ajustés à contact optique avec les microscopes, et l'on a observé une hauteur a sur la règle m dans la figure 1. Comme les deux niveaux de mercure, après l'achèvement d'une mesure, se trouvent toujours à la même distance au-dessous des objectifs de leur microscopes, les oculaires étant placés dans leurs positions de zéro, la colonne de mercure qui détermine la différence de pression sera $= a - b$, où b est la hauteur sur la règle, observée quand la même pression réside dans les deux tubes de manomètre. La première tâche sera donc de déterminer b , représentant la hauteur de pressions égales, ce qui se fait de la manière suivante: On a pratiqué des ouvertures opposées dans les tubes de laiton qui portent les tubes de manomètre, pour permettre d'observer les surfaces de mercure quand il est nécessaire. On établit une communication entre les espaces, remplis d'air, des deux tubes de manomètre et les évacue ensuite complètement. Puis on varie la hauteur du microscope mobile jusqu'à ce qu'on puisse juger, en regardant les ménisques par les ouvertures, qu'ils ont à peu près la même distance de leurs objectifs. Les deux oculaires sont placés dans leurs positions de zéro. Alors on peut obtenir assez vite, tant en manipulant le système de pression sur le tube de caoutchouc s qu'en modifiant la hauteur du microscope B par un mouvement micrométrique, une vision approximativement nette dans les deux microscopes. Tout l'appareil est presque complètement protégé contre les variations de la température par du papier-nickel. Maintenant on achève la protection en couvrant aussi les ouvertures susdites, et lorsqu'on est

presque sûr que les différences éventuelles de température sont égalisées, on termine le travail en rendant les images aussi nettes que possible.

Pourtant on ne doit pas perdre son temps en tâchant de faire coïncider les images nettes avec les oculaires placés exactement dans leurs positions de zéro. Lorsque les images sont approximativement nettes on termine le travail en modifiant la hauteur de l'oculaire; on commence par trouver des limites restreintes de la position exacte en élevant et en abaissant alternativement l'oculaire et l'on finit par un abaissement, parce que j'ai trouvé qu'un mouvement dans cette direction donne le passage le plus rapide à la vision nette. Comme il est démontré plus bas on peut calculer sur la base de la hauteur visée de l'oculaire un terme de correction qui, ajouté à la hauteur visée sur la règle, donne la hauteur de pression qu'on cherche correspondant aux positions de zéro des oculaires. (J'ai donné à la désignation »vision nette« une marge correspondant à peu près à une modification de la hauteur du niveau de mercure de 1μ). Le réservoir d'un thermomètre est placé à proximité des tubes de manomètre.

Si l'on veut mesurer la pression d'un gaz, on fait le vide dans les deux tubes de manomètre, conserve la communication entre le tube mobile et la pompe et laisse ensuite passer lentement le gaz dans le tube fixe tout en remontant le tube mobile et en observant les deux niveaux de mercure par les ouvertures. L'équilibre établi le procédé est le même que pour la détermination de la hauteur de pressions égales: on observe la hauteur de la règle et des deux oculaires ainsi que la température.

3. Formation d'images dans un microscope à contact optique avec variation de la hauteur de l'oculaire.

Fig. 3a et 3b représentent toutes les deux le même microscope: 3a montre l'oculaire dans sa position de zéro,

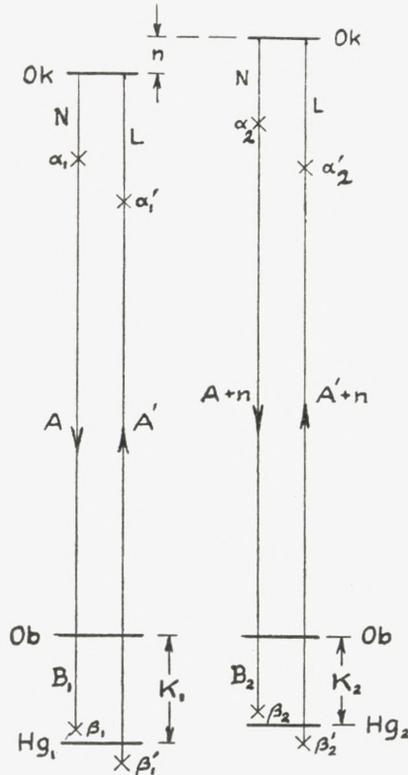


Fig. 3a et 3b.

tandis que dans 3b l'oculaire est levé. Les signes Ob représentent les deux plans principaux de l'objectif qui sont considérés comme coïncidents. Ok a la même signification pour l'oculaire. Hg_1 représente le niveau de mercure dans le tube de manomètre appartenant au microscope. α_1 est un des trois traits du prisme luisant p dans la figure 2. Abstraction faite ici de la présence du double prisme d dans la figure 2, n'ayant pour but que d'écartier l'image,

l'image β_1 , que reproduit l'objectif de α_1 , se trouve dans l'axe du microscope A où l'on suppose aussi que se trouve α_1 .

La surface de mercure forme l'image β'_1 qui, dans la figure, est tirée à côté de sa place symétrique afin d'être plus visible. L'objectif forme de β'_1 l'image α'_1 qui est observée par l'oculaire. Hg_1 est supposé se trouver à une distance K_1 de l'objectif qui donne la vision nette de l'image α'_1 . On remonte alors l'oculaire à une hauteur quelconque n et le niveau de mercure est approché assez près de l'objectif pour que l'image de α_2 se représente nettement dans l'oculaire, ce qui a pour conséquence que la distance L de α'_2 à Ok reste la même. Il en est de même pour la distance N de α_2 , étant donné que α_2 est invariablement réuni avec Ok .

La formule de la lentille donne dans les deux cas avec les désignations indiquées dans la figure et P étant la distance focale de l'objectif

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{A} + \frac{1}{B_1} &= \frac{1}{P} = \frac{1}{A'} + \frac{1}{2K_1 - B_1} \\ \frac{1}{A+n} + \frac{1}{B_2} &= \frac{1}{P} = \frac{1}{A'+n} + \frac{1}{2K_2 - B_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Ayant éliminé B_1 et B_2 de ces équations on a déterminé K_1 et K_2 , et par conséquent la modification de hauteur du niveau de mercure.

$$r = K_1 - K_2 = \frac{n}{2} \left[\left(\frac{P}{A-P} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{n}{A-P}} + \left(\frac{P}{A'-P} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{n}{A'-P}} \right].$$

Si l'image β_1 coïncide avec la surface de mercure, ce qui est le but et ce qu'on peut presque obtenir en pointant l'oculaire sur le milieu de l'hypoténuse de p , N sera égal à L et l'on aura

$$r = r_0 = \left(\frac{P}{A-P} \right)^2 \frac{n}{1 + \frac{n}{A-P}} \quad (2)$$

ce qui résulte aussi directement des deux premières équations en posant $B_1 = K_1$ et $B_2 = K_2$. Si β_1 coïncide avec Hg_1 , β_2 coïncidera aussi avec Hg_2 , étant donné que N et L restent réciproquement de la même longueur.

S'il y a une petite différence entre L et N , $\lambda = L - N$, on trouve avec l'approximation nécessaire

$$r - r_0 = \frac{\lambda}{A-P} r_0,$$

quantité qui dans les circonstances données ne peut s'élever qu'à $1/10 \mu$ au plus.

La quantité r_0 , tirée de l'équation (2) quand on a observé la hauteur de l'oculaire n , nous donne le terme de correction, mentionné à la page 17, dont on se sert lorsque, dans la mesure d'une pression, les oculaires n'ont pas été dans leurs positions de zéro comme il est ordinairement le cas. Par soustraction de la quantité r à la distance normale K on trouve la position réelle de cette surface entre l'objectif et le niveau de mercure.

Dans les deux microscopes verticaux du manomètre sont employées, à titre d'objectifs, des achromatiques B Zeiss dont la distance focale est indiquée à 12 mm. La distance d'objet est de 3 mm. Les oculaires sont des oculaires de compensation Zeiss 18. Pour tirer r de l'équation (2) il faut connaître la distance A de l'objectif à l'oculaire. A est de 18,5 cm environ.

En introduisant dans l'équation (2) $P = 1,2$ cm et $A = 18,5$ cm on a

$$r_0 = 0,00481 \frac{n}{1 + 0,0578 n} \text{ cm.}$$

Dans l'observation de n dans l'appareil l'unité employée est de $\frac{1}{50}$ cm, et en introduisant cette unité pour n dans l'équation et remplaçant r_0 par s et n par m on a

$$\left. \begin{aligned} s &= 0,0000962 \frac{m}{1 + 0,001156 m} \text{ cm} = \\ 0,962 \frac{m}{1 + 0,00116 m} \mu &= c \cdot m \mu \end{aligned} \right\} \quad (3).$$

On voit par là que le facteur c auquel on peut attribuer une valeur de 0,962 ($1 - 0,00116 m$) accuse un faible décroissement avec une hauteur d'oculaire croissante. m peut varier entre -20 et $+20$ mais ne dépassera que rarement 10. L'équation (3) donne

$$c_{-20} = 0,984, c_{-10} = 0,973, c_0 = 0,962, c_{10} = 0,951, c_{20} = 0,940.$$

Dans l'emploi, les deux premières décimales seules ont de l'importance. La valeur $P = 12$ mm peut être admise comme une valeur assez exacte pour le calcul de c , tandis que la valeur $A = 18,5$ cm est moins exacte parce qu'elle est trouvée par une mesure estimative à l'extérieur des microscopes. C'est pourquoi j'ai calculé, comme contrôle, c_0 sur la base d'une série d'observations, mentionnées plus bas, dans lesquelles m a été varié entre des limites assez larges. Par cela j'ai trouvé en me servant de μ à titre d'unité de longueur

$$c = 0,986 (1 - 0,00116 m).$$

On obtiendrait aussi cette valeur si, dans l'équation (2), on posait $A = 18,3$ cm au lieu de 18,5 cm, différence qui ne dépasse pas les limites des erreurs dans la mesure de A . En posant $c_0 = 0,986$ on a

$$c_{-20} = 1,009, c_{-10} = 0,997, c_0 = 0,986, c_{10} = 0,975, c_{20} = 0,963. \quad (3')$$

4. Application de la correction pour les hauteurs d'oculaires inexacts.

La figure 4 démontre les conditions d'une détermination de la hauteur de pressions égales. La même pression est exercée dans les deux tubes de manomètre, et l'on suppose provisoirement que le contact optique a été établi

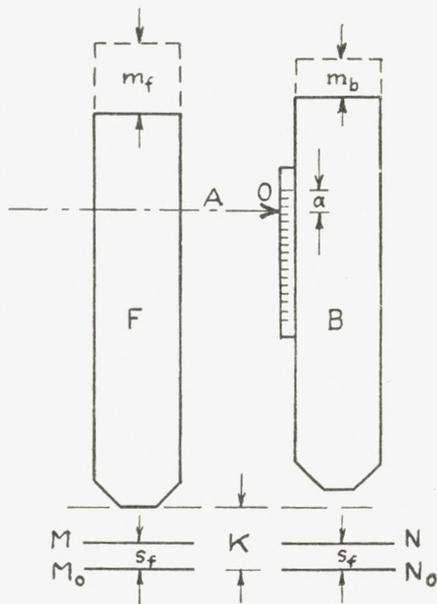


Fig. 4.

entre les microscopes F et B et les surfaces de mercure M_0 et N_0 , les oculaires étant dans leurs positions de zéro. Le microscope B se trouve alors dans sa hauteur pressions égales. O est le point sur la règle, réunie avec B , qui se rencontre avec l'axe A du microscope-viseur, réuni avec F . Les objectifs se trouvent dans leur distance normale K des surfaces.

On monte alors les deux oculaires aux hauteurs m_f et m_b . En se souvenant que F est fixe, la question est de savoir, comment il sera possible de rétablir le contact

optique. D'abord il faut remonter les niveaux de mercure à une telle hauteur $s_f = c_f m_f$ que, suivant l'équation (3), le contact est établi avec F , tout en remontant en même temps B à une telle hauteur a que le contact y est aussi établi; on cherche une expression pour a .

Si l'oculaire de B avait été remonté autant que celui de F , B conserverait sa hauteur, la hauteur de pressions égales; mais la surface N s'est cependant trop approchée de l'objectif de B , il faut par conséquent remonter B d'une hauteur correspondant à la différence $m_f - m_b$ entre les hauteurs des oculaires, et alors on a

$$a = c_f m_f - c_b m_b \mu. \quad (4)$$

Ce changement de hauteur rend en effet la distance de l'objectif au niveau de mercure égale à l'expression $K - c_b m_b$ qui, d'après l'équation (3), donne le contact.

Si l'on a établi contact optique par les hauteurs des oculaires m_f et m_b et observé la hauteur de la règle, on trouve la hauteur de pressions égales par une soustraction de $a = c_f m_f - c_b m_b \mu$ à la hauteur observée.

Si la condition de pressions égales, montrée dans la figure 4, est remplacée par un excédent de pression, égal à la pression d'une colonne de mercure h dans le tube de manomètre au-dessous de F , et si l'on remonte B , tout en conservant les hauteurs des oculaires m_f et m_b , à une hauteur h au-dessus de sa position dans la figure 4, on aura établi équilibre conjointement avec le contact optique. La hauteur visée sur la règle est alors $H = h + l + a$ où l représente la hauteur de pressions égales, et puis on trouve la différence de hauteur demandée par l'équation

$$h = H - l - (c_f m_f - c_b m_b) \mu. \quad (5)$$

Si la même pression est exercée dans les deux tubes de manomètre, $h = 0$, on aura, comme il est montré plus haut,

$$l = H - (c_f m_f - c_b m_b). \quad (6)$$

5. Détermination de la hauteur de pressions égales, l'exactitude de la mesure.

La hauteur de pressions égales pourrait être déterminée avec une précision d'une petite fraction de μ , si l'on pouvait, sans risquer de petites modifications dans la construction de l'appareil, remplacer provisoirement les tubes de manomètre par un vase avec une grande surface de mercure, placé au-dessous des deux microscopes à une distance presque égale à la distance normale K des objectifs, et établir ensuite le contact optique et observer H , m_f et m_b dans l'équation 6. Cependant comme il est presque impossible d'éviter de telles modifications, on est obligé de se servir des surfaces de mercure dans les tubes de manomètre, et l'on s'assure alors de l'égalité des pressions en établissant une communication entre les tubes et en les évacuant, tout en s'assurant aussi qu'il n'y a pas de différences de température de quelque importance dans les diverses parties de l'appareil. Après avoir fait le vide on rompt la communication avec la pompe. Par ce procédé la capillarité dans les tubes de manomètre, dont les diamètres sont de 30 mm, pourra exercer son influence.

J'ai fait de cette manière 22 déterminations qui donnent la valeur de la hauteur de pressions égales et son erreur moyenne et nous font savoir en même temps l'exactitude qu'on peut s'attendre à obtenir par une mesure de pressions.

Chaque jour d'expérience j'ai fait 5 ou 6 déterminations

avec variation des valeurs de m_f et m_b . Le tableau ci-après donne des exemples des observations et de leurs valeurs calculées.

La température du manomètre est observée sur un thermomètre divisé en $1/10^\circ$. La hauteur d'un trait de millimètre, choisi pour trait de zéro, est déterminée par la distance de l'image de ce trait dans le microscope-viseur (A fig. 1) au fil fixe du microscope, mesurée sur le tambour qui indique la hauteur, prenant μ comme unité. m_f et m_b sont les hauteurs observées des oculaires, cm_f et cm_b sont les niveaux de mercure s (voir l'équation (3) à la page 21), y correspondants. La hauteur corrigée l du trait indiquant la hauteur de pressions égales et correspondant à $m_f = m_b = 0$, peut être tirée de l'équation 6 (page 24).

Le 25 avril 1927.

Température du manomètre	18,60	18,55	18,60	18,65	18,70
La hauteur H du trait-zéro, indiquée en μ	-72,7	-66,9	-60,9	-66,3	-72,9
m_f	2,3	4,1	9,0	8,4	6,4
m_b	13,1	12,4	10,0	13,4	18,9
cm_f	2,3	4,0	8,7	8,2	6,3
cm_b	12,7	12,1	9,8	13,0	18,3
La hauteur corrigée l du trait-zéro, indiquée en μ ..	-62,3	-58,8	-59,8	-61,5	-60,9

Les 22 observations ont donné des valeurs pour la hauteur de pressions égales dont les écarts de la moyenne $-61,7 \mu$ — figurent dans le tableau suivant:

+ 0,6	-- 0,6	+ 0,4	+ 0,1
- 2,9	+ 2,4	- 1,1	- 1,0
- 1,9	+ 3,3	- 0,8	- 0,3
- 0,2	+ 0,8	+ 0,2	+ 0,4
+ 0,2	+ 1,5	- 0,2	+ 1,3
		- 0,6	+ 0,9

La moyenne susdite $-61,7 \mu$ — est trouvée par emploi de la méthode des moindres carrés en introduisant les observations dans l'équation (6) où $c = c_0 (1 - km)$. On cherche des valeurs égalées pour l et c_0 , tandis que la valeur 0,00116 pour k , calculée à la page 21, peut être conservée parce qu'elle doit être admise comme une approximation suffisante. Comme mentionné à la page 21, c_0 est trouvé égal à 0,986. L'erreur moyenne dans une mesure de l est calculée à $1,3 \mu$.

Chacune des quatre colonnes dans le tableau ci-dessus comprend les observations d'une journée. Si l'on regarde les signes des colonnes on devrait croire qu'une erreur systématique se fût glissée dans chaque colonne, et cette présomption serait confirmée si l'on faisait une comparaison de l'erreur moyenne avec les erreurs possibles des observations et des ajustages. En observant la règle deux ou trois fois on peut obtenir une exactitude de $1/2 \mu$, et l'exactitude qu'on peut obtenir dans les ajustages par déplacement des oculaires ainsi que par observation de la hauteur de l'oculaire, est beaucoup plus grande. L'erreur moyenne de la hauteur de pressions égales étant ainsi trois fois plus grande que l'erreur de l'observation il faut donc chercher une autre source d'erreur, et il n'y a pas de doute qu'elle ne doive être imputée à la capillarité. Une autre source d'erreur pourrait provenir des différences de température dans les deux soutiens qui portent les deux tubes de manomètre et dans les deux colonnes de mercure qui se font réciproquement équilibre. Les conditions favorables de température dans le local (un sous-sol avec des murs épais et sans chauffage artificiel), la construction symétrique de l'instrument, la protection presque complète de celui-ci par des surfaces polies de métal, le laps de temps très court

pendant lequel l'observateur doit être à proximité de l'appareil, et sa position symétrique par rapport à celui-ci, le tout devait probablement exclure des erreurs sensibles, provenant de différences de température. L'instrument est placé sur une forte console de pierre qui est fixée à un gros mur en brique.

En ce qui concerne les colonnes de mercure, il faut se rappeler que 10 cm de celles-ci sont plongés dans un bain de mercure, de sorte qu'il n'en reste que 7 cm qui sont entourés d'air.

Vu l'influence de la capillarité les expériences, dont les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessus, ont été variées de telle sorte qu'on pût aussi s'attendre à des variations de la grandeur de cette influence. Ces variations furent produites par élévations ou abaissements du tube mobile du manomètre, ce qui avait pour résultat que l'un des ménisques s'abaissa tandis que l'autre monta par rapport aux parois des tubes, et les courbes des ménisques furent par là modifiées. Dans d'autres cas les deux niveaux ont été remontés ou abaissés par variations de la quantité de mercure à l'aide du système de pression, désigné par s dans la figure 1. Enfin on pourrait produire des modifications plus accidentelles en levant ou en abaissant le tube jusqu'à un millimètre entier et, au bout de quelques minutes, le remettre à sa hauteur primitive. La différence des signes des quatre jours d'expérience doit provenir de modifications de la forme des ménisques qui se sont produites les jours intermédiaires pendant lesquels l'appareil n'a pas été en usage.

Dans les 22 observations de la hauteur de pressions égales on a donc constaté qu'en se servant d'un manomètre à mercure avec des tubes de diamètres de 3 cm environ

on doit compter avec l'influence de la capillarité dont l'importance sera un peu supérieure à 1μ . Dans des cas extraordinairement défavorables l'erreur peut s'élever à 3μ dans une seule observation. Pour obtenir une utilisation complète de la méthode il sera donc nécessaire d'employer des tubes un peu plus larges. Cette théorie est en conformité avec ce qui résulte des mesures de la pression de vapeur d'eau à zéro qu'ont faites SCHEEL et HEUSE¹ par emploi d'un manomètre RAYLEIGH² modifié, avec des tubes de 25 mm de diamètre. Pendant cinq jours différents la pression a été mesurée au total 15 fois. La moyenne de quatre mesures, exercées un de ces jours, montre un écart de $1,6 \mu$ de la moyenne de toutes les mesures, différence qui est due vraisemblablement pour la plus grande partie à la capillarité.

6. Mesure de petites variations de pression seulement par changements des hauteurs des oculaires.

Le tube fixe du manomètre, F dans la figure 5, communique par des tubes de verre de 3,2 mm de diamètre avec un réservoir V d'une capacité de 353 cm^3 . F peut d'ailleurs par l'intermédiaire du réservoir G entrer en communication avec l'autre tube de manomètre B et avec la pompe à air ou avec le gaz qu'on veut étudier.

G communique en bas par un conduit d'une longueur supérieure à 76 cm avec le réservoir de mercure H .

Si l'on veut entreprendre une mesure de pressions, on abaisse H et fait le vide dans tout l'appareil, et puis on introduit le gaz à étudier jusqu'à ce qu'on ait obtenu la

¹ SCHEEL et HEUSE: Zeitschrift für Instrumentenkunde, tome 29, page 344, 1909 et tome 30, page 45, 1910.

² Lord RAYLEIGH: Phil. Trans. tome 196, page 190—205, 1901.

pression désirée. En remontant *H* on enferme le gaz dans *V*, et on fait le vide dans le tube mobile du manomètre tout en le soulevant en même temps, après quoi la mesure

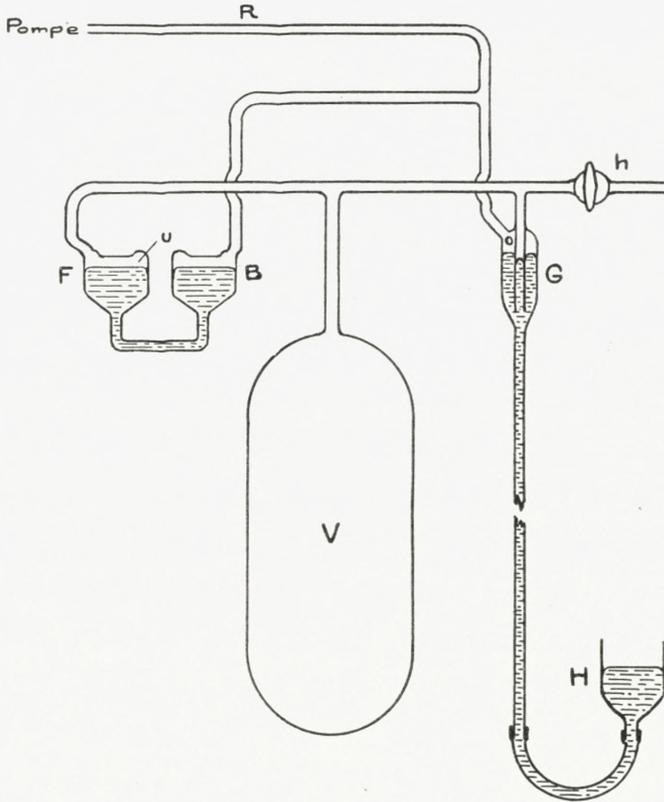


Fig. 5.

de pression peut être effectuée comme il a été expliqué à la page 23.

L'évacuation de *B* par la pompe rotative à mercure GAEDE se poursuit pendant toute l'expérience, et le vide est constaté à l'aide d'un tube à vide.

Pour produire d'assez faibles modifications connues de pression le réservoir *V* fut rempli d'hydrogène, exerçant une pression de quelques millimètres de mercure. Un vase DEWAR, enveloppant *V*, fut rempli d'eau sur laquelle nageait

une couche de glace finement pilée. L'eau fut agitée par un courant d'air. Un thermomètre, divisé en $1/100^\circ$ et ayant été secoué avant l'observation, y était plongé. Les observations de la mesure de pression étant terminées, on ajouta à l'eau une telle quantité d'une solution de chlorure de sodium que l'abaissement de température, causé par cette solution, a donné à l'hydrogène dans V une diminution de pression égale à la pression d'une colonne de mercure de quelques μ .

Avant que la modification de pression se produisît les deux microscopes verticaux étaient en contact optique avec leurs surfaces de mercure, et la mesure de la modification de pression fut alors effectuée de la manière que le contact fut rétabli par un déplacement des deux oculaires, tandis que le tout restait d'ailleurs sans être déplacé. La modification de pression fut donc mesurée indépendamment de la règle et du microscope-viseur et par conséquent avec une exactitude absolue qui est beaucoup plus grande que dans les mesures de pressions plus élevées. Les résultats de 6 de ces mesures sont indiqués dans le tableau suivant où les diminutions de pression visées sont comparées à celles calculées sur la base de l'abaissement de la température d'après la formule suivante

$$P \left(\frac{V}{273} + \frac{u}{T_1} \right) = (P - p) \left(\frac{V(1 - \gamma \vartheta)}{273 - \vartheta} + \frac{u}{T_2} \right)$$

où P est la pression de l'hydrogène à 0° , p la modification de pression, ϑ l'abaissement de la température exprimé en degrés Celcius, T_1 et T_2 sont les températures absolues du volume u (le volume du tube de manomètre F et des tubes d'alimentation), γ représente le coefficient de dilatation du réservoir V qui est posé à $27,3 \cdot 10^{-6}$. Le volume u est

connu par les mesures qui sont mentionnées ci-après et qui ont donné $\frac{u}{V} = 0,0186$.

P exprimé en millimètres...	3,8443		3,3118	3,0764	7,7206		
θ° Celcius	0,583	0,473	0,429	0,516	0,109	0,417	
p exprimé en μ {	calculé	7,9	6,4	5,9	5,7	3,0	11,2
	observé	8,3	6,3	5,2	6,2	2,4	9,6
différence...	-0,4	+0,1	-0,2	-0,5	+0,6	+1,6	

Dans la dernière expérience, la différence relativement grande de $1,6 \mu$ est certainement pour la plus grande partie due à la capillarité, causée par la modification de pression de $11,2 \mu$ qui est aussi relativement grande. D'ailleurs les expériences montrent la possibilité de mesurer, seulement au moyen de l'ajustage des oculaires, de petites pressions ou des modifications de pression avec une exactitude d'une fraction de μ si l'on se sert de tubes assez larges pour parer aux erreurs provenant de la capillarité.

7. Mesure de pressions assez élevées.

En vue d'un emploi projeté de l'appareil, montré dans la figure 5, comme partie d'un thermomètre à air, permettant l'emploi d'un petit réservoir de thermomètre (d'une capacité de 12 cm^3 environ), j'ai fait des expériences pour déterminer la quantité u représentant la capacité de l'espace au-dessus du mercure dans le tube de manomètre F et des espaces dans les conduits, assez étroits, établissant la communication entre ce tube et V , h et G . Les expériences sont mentionnées ici à titre d'exemples de l'emploi du manomètre pour des mesures de pressions, exercées par une colonne de mercure d'une hauteur de 30 mm environ.

La détermination dudit espace nuisible u a été faite

de la manière suivante: Ayant établi la communication par l'intermédiaire de G entre les deux tubes de manomètre, je fis le vide dans tout l'appareil et j'introduisis ensuite une quantité d'hydrogène, exerçant une pression égale à une colonne de mercure de 20 à 30 mm. Le réservoir V était plongé dans un vase de Dewar avec de l'eau à la température de l'air, agitée par un faible courant d'air. Après interruption de la communication entre F et B le tube de manomètre B fut évacué tout en étant levé jusqu'à établir approximativement le contact optique dans les deux tubes de manomètre. La hauteur fut observée sur la règle réunie avec B , de même qu'on visa les températures du manomètre et de l'eau dans le vase de Dewar sur des thermomètres divisés en $1/10^\circ$. Puis le contact optique fut établi par un déplacement des oculaires et l'on observa les hauteurs des oculaires. Tandis que la hauteur observée sur la règle ne fut pas variée, les autres observations furent répétées plusieurs fois. Ces observations étant terminées, l'eau dans le vase DEWAR fut remplacée par de la glace finement pilée, et l'on ajouta de l'eau distillée. Par ce moyen la pression d'hydrogène fut réduite, et la réduction fut mesurée par une série d'observations analogues à celles que je viens d'expliquer plus haut, omission faite pourtant ici de l'observation de la température dans le vase de DEWAR.

J'ai exercé trois déterminations du volume u . Dans le tableau suivant les observations, appartenant à une des déterminations, sont indiquées.

T_1 et T_2 sont respectivement les températures du réservoir V et du manomètre, $H-l$ représente la hauteur de la règle au-dessus de la hauteur de pressions égales, m_f et m_b sont les hauteurs des oculaires, c est le facteur de réduction, tiré de l'équation (3) et représentant ici la diffé-

	l'eau dans le vase de Dewar		la glace dans le vase de Dewar	
$T_1 - 273^\circ$	19,46°		0,00°	
$T_2 - 273^\circ$	19,95°		20,00°	
$H - l$ mm		28,2666		26,4250
m_b	+ 5,6		+ 10,4	
m_f	+ 5,2		+ 5,1	
$(cm_b - cm_f) 10^{-3}$		0,0004		+ 0,0051
$h = H - l + (cm_b - cm_f) 10^{-3}$...		28,2670		26,4301

rence de hauteur entre les deux niveaux de mercure dans les tubes de manomètre, calculée d'après l'équation (5).

On peut déterminer le volume u sur la base des deux valeurs pour h dans l'équation suivante:

$$u = \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{h_1 (T_1 - 273)}{(h_2 - h_1) 273} - \frac{h_2}{h_2 - h_1} (T_1 - 273) \gamma - 1 \right) V,$$

où h_1 et h_2 sont les colonnes de mercure qui correspondent respectivement aux températures 273° et T_1 du réservoir V , et γ représente le coefficient de dilatation de celui-ci et est posé égal à $27,3 \cdot 10^{-6}$.

Les trois déterminations ont donné pour u les valeurs suivantes

$$6,7 \quad 7,0 \quad 6,0 \text{ cm}^3.$$

Les températures T_2 et T_1 ont été presque égales dans chacune des déterminations et tout près de 293° . La plus grande erreur qui puisse se produire dans la détermination de u dépend de l'erreur dans $h_2 - h_1$. Si l'on pose $h_2 - h_1 = p$ et fait abstraction ici du petit terme au milieu de la formule de u , et étant donné que $V = 353 \text{ cm}^3$, on aura

$$\delta u = \frac{h_1}{p} \cdot \frac{20}{273} \cdot 353 \frac{\delta p}{p}.$$

Comme $\frac{h_1}{p}$ est en moyenne égal à 14 et p égal à 1600 μ , on a, si l'erreur moyenne est posée égale à 2 μ ,

$$\delta u = 0,5 \text{ cm}^3,$$

ce qui correspond aux déviations des trois déterminations de la moyenne 6,6 et à l'exactitude à laquelle on peut s'attendre dans chacune des deux mesures de pression d'où résulte p .

Le volume u est déterminé par la hauteur du niveau de mercure dans le tube de manomètre fixe F quand son microscope, avec une hauteur d'oculaire normale, est en contact optique avec la surface. Or, dans une mesure de pression, cette hauteur s'écarte ordinairement de la hauteur normale. La variation de u , causée par cela, ne s'élève pourtant qu'à $1/100 \text{ cm}^3$. Les différents angles de raccordement de la surface de mercure avec les parois du tube ont certainement une plus grande importance.

8. Le triple point de l'eau pris comme point fixe de température. Mesure de la pression du triple point.

Le triple point signifie, comme on le sait, l'état d'un corps où, en équilibre de température, le corps existe ou peut exister simultanément à l'état solide, liquide et gazeux. S'il s'agit d'un corps pur, la température, commune aux trois états, est fixe et par ce fait aussi la pression, car il est question de vapeur saturée.

Jusqu'en 1926 on trouva dans les cours de physique l'indication que la température du triple point de l'eau est de $0,0074^\circ \text{ C}$. supérieure au zéro thermométrique, étant donné que la formule de Clapeyron indique cette différence

comme effet de l'augmentation de la pression de 4,6 mm à 760 mm de mercure.

Cependant on n'avait pas pensé à une circonstance qu'il faut aussi prendre en considération dans le calcul de cette différence de température, à savoir: la circonstance que l'eau qui entoure chaque morceau de la glace finement pilée, employée pour la détermination du zéro thermométrique, est une solution d'oxygène et d'azote, de sorte que le point de fusion baisse aussi pour cette raison.

En 1893 j'ai publié un ouvrage, intitulé »Point de fusion de la glace au contact de corps gazeux«,¹ dans lequel j'ai étudié le point de fusion de la glace lorsqu'elle est au contact de divers corps gazeux.

Dans le même ouvrage j'ai démontré comment on pouvait calculer sur la base du coefficient d'absorption d'un gaz et de la chaleur d'absorption, la dépression du point de congélation.

La formule donne pour l'air atmosphérique

$$\Delta T = 0,0099 \infty^{1/100^{\circ}},$$

qui est donc la différence entre la température du triple point et le zéro thermométrique.

Mon traité a été complètement négligé bien qu'il fût amplement rapporté dans les »Beiblätter« et bien qu'à la Conférence générale des Poids et Mesures en 1895², à laquelle assistaient plusieurs experts de thermomètre, j'aie donné une explication de mes résultats.

¹ Videnskabernes Selskabs Oversigter (Bulletins de l'Académie royale des Sciences et des Lettres de Danemark) 1893, p. 151—166 et p. 274, et Journal de Physique. 3. Série, tome 2, 1893, p. 353—364.

² Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures, Tome XII. Deuxième Conférence Générale, page 56 et 63.

Il y a deux ans seulement, en 1926, mon traité a été remarqué en Amérique, grâce au rapport dans les »Beiblätter«, par FOOTE et LEOPOLD, et mentionné par ceux-ci dans le »Sillimans Journal« (5), tome 11, page 42, 1926.

Ce traité a été publié au sujet d'un recueil de points de congélation exactement connus pour »The international Critical Tables«. On fait observer qu'on a ordinairement omis jusqu'ici dans les déterminations des points de solidification de prendre en considération l'erreur qui est due à la présence d'air atmosphérique dissous.

Dans le même ordre d'idées les auteurs citent mon ouvrage comme celui qui a traité le premier la question, et dans un nouveau calcul de la température du triple point ils ont trouvé le chiffre $+0,0098^{\circ}$ qui ne diffère donc que de $1/10000^{\circ}$ du chiffre que j'ai trouvé.

Il n'est question ici que de petites différences de température, mais il faut se rappeler qu'on se sert souvent de thermomètres, gradués en $1/100^{\circ}$, avec lesquels on peut donc apprécier $1/1000^{\circ}$. Même si alors la capillarité et la variabilité du verre peuvent donner aux observations de $1/1000^{\circ}$, effectuées à l'aide du thermomètre à mercure, une exactitude douteuse, le thermomètre à platine n'est certainement pas soumis à l'influence de défauts correspondants, et la sensibilité de celui-ci égale sans doute celle du thermomètre à mercure.

Mais cette question est difficile à étudier parce que la détermination du zéro thermométrique est entachée d'une erreur qui est plus grande qu'on ne s'en est ordinairement rendu compte. Elle est due à la difficulté de se procurer de la glace d'une pureté suffisante. F. HENNING qui est un des experts les plus grands en ce qui concerne les mesures

de température, affirme dans le »Handbuch der Physik«¹ que même en prenant les mesures ordinaires de précaution on doit compter avec une erreur de 3 ou 4 millièmes de degré dans les déterminations du zéro, ce qui résulte aussi de ce qu'on est conseillé de préférer la glace naturelle à la glace fabriquée avec de l'eau distillée.

Cette circonstance entraîne naturellement une erreur correspondante dans le calcul de la température du triple point, et c'est pourquoi l'on se pose la question si l'on ne doit pas procéder inversement, à savoir: se servir de la température du triple point comme point de départ et déterminer sur cette base le zéro thermométrique.

Pour pouvoir répondre à cette question il faut savoir si la température du triple point se produit avec une plus grande exactitude que le zéro thermométrique.

Dans un récipient complètement isolé et ne contenant que de la glace, de l'eau et de la vapeur d'eau, les trois phases se produiront spontanément; malheureusement il est impossible de construire un tel récipient.

Toutefois j'ai pensé pouvoir produire les trois phases dans une partie limitée d'un récipient et durant un temps limité mais assez long pourtant pour qu'on puisse effectuer les mesures nécessaires avec une exactitude suffisante. L'appareil que j'ai construit dans ce but est démontré dans la figure 6.

L'orifice du ballon *A* fut fermé par une lame de verre, fixée avec de la cire à cacheter, pour qu'on pût observer par cette lame le contenu de *A* dans le cas où il serait nécessaire. De l'eau bouillie distillée qu'on avait fait entrer dans le ballon *B* fut par une distillation dans le vide in-

¹ Handbuch der Physik, tome IX, page 595.

roduite dans *A* où elle monta presque à demi vers le centre du ballon. Après cette distillation l'eau fut transversée dans *B* par une inclinaison de tout l'appareil, et les parois de *A* reçurent par là encore un rinçage, après quoi la quantité d'eau dans *B* fut augmentée par une introduction supplémentaire et de nouveau introduite dans *A* par une nouvelle distillation. Ensuite, par l'entremise de deux tubes avec les

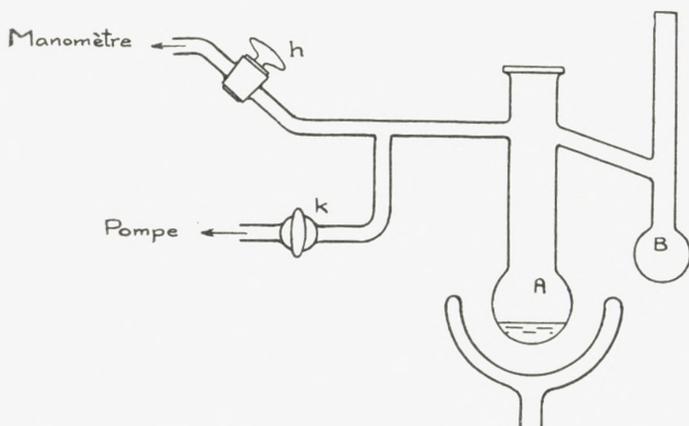


Fig. 6.

robinets *h* et *k*, l'appareil fut mis en communication respectivement avec le manomètre et avec une pompe de GAEDE, et puis le tube d'alimentation du ballon *B* fut bouché. Le manomètre était monté avec les communications démontrées dans la figure 5 (page 29), mais le réservoir *V* avait été enlevé et son tube d'alimentation fut fermé.

L'appareil est construit d'une espèce de verre qui, d'après les examens faits par le »Physikalisch-Technische Reichsanstalt« à Charlottenburg, est indiquée comme appartenant aux meilleures espèces de verre en ce qui concerne la force de résistance contre les dissolvants. Avant ledit remplissage le vase *A* était resté pendant plus de 6 heures rempli d'eau à 100°.

Le ballon *A* fut entouré de glace et, le robinet *h* fermé, tout l'appareil fut bien évacué d'air. Entre le robinet *k* et la pompe était intercalé, pour absorber la vapeur d'eau de *A*, un tube à chlorure de calcium en forme de *U* d'une longueur de 50 cm environ et de 2 cm de diamètre.

Au moyen de neige carbonique, humectée d'alcool, toute la quantité d'eau fut transformée en glace pendant que l'évacuation se poursuivait, et après la fermeture du robinet *k* un vase de DEWAR avec de la glace finement pilée fut placé sous *A*. Comme elle avait été fortement refroidie la glace dans *A* gardait longtemps une surface sèche, mais pour produire dans un laps de temps raisonnable la naissance d'eau sur la surface de la glace, le tube fut chauffé avec la main.

Lorsqu'on aperçut par une observation à travers les parois du ballon (la glace extérieure était presque au niveau du bord de la glace intérieure) que la surface de la glace devint humide, le robinet *h* fut ouvert de sorte que la chambre de la vapeur d'eau entrât en communication avec le manomètre dont le tube était évacué depuis longtemps par une pompe de GAEDE. Avant l'ouverture du robinet on avait coupé la communication entre les deux tubes de manomètre par la colonne de mercure dans le tube *G* (fig. 5), de sorte que le manomètre fût prêt à mesurer la pression de la vapeur. L'évacuation du tube mobile du manomètre se poursuivait pendant toute la durée de l'expérience; la pompe était en communication avec un tube à vide par lequel on pouvait constater, après une mesure préalable avec une jauge de Mc.LEOD, que la pression de l'air restant ne s'élevait qu'à une fraction de 1μ .

La situation dans le ballon peut alors être caractérisée comme suit: La glace extérieure empêchant la glace dans *A* de se fondre du fond il n'y a sur la glace dans *A* qu'une couche d'eau très mince, produite par le rayonnement thermique des parois au-dessus de la glace. Comme cette couche d'eau est à la face inférieure au contact de glace et à la face supérieure au contact de vapeur pure, et comme son épaisseur minime exclut une différence sensible de température entre la face supérieure et la face inférieure, je crois avoir obtenu les conditions les plus favorables pour que l'eau ait la température du triple point, ce qui se confirme aussi par la grande stabilité de la pression de vapeur qu'ont montrée les expériences. Le diamètre de la surface de la glace était de 4 cm.

Lorsque, dans une mesure réitérée de la pression, la fusion s'augmentait peu à peu et que la couche d'eau était sur le point de devenir trop épaisse, il fut établi communication avec la pompe par le robinet *k* pendant une ou deux minutes, et on obtint par là bien vite une nouvelle congélation de l'eau. Pendant cette évacuation le robinet *h* restait ouvert, ce qui causa une diminution de pression dans le manomètre égale à la température de la nouvelle couche de glace. Si le robinet *k* était fermé et que l'on aperçût de nouveau une naissance d'eau sur la surface de la glace, la pression montait vivement à la même hauteur qu'avant les évacuations. Dans le tableau suivant où on a donné aux lettres les mêmes significations que dans le tableau figurant à la page 33, sont données les observations dans la première mesure de la pression de vapeur avec indication des heures des observations.

Le 28. novembre 1927.

Millimètres

Heures	$H - l$	$(cm_b - cm_f) 10^{-3}$
3 h · 18		+ 0,0010
— 45		04
4 h · 05		15
— 10		21
— 11	4,5922	évacuation faite de A
— 25		17
— 30		évacuation faite de A
— 45		12

La moyenne = + 0,0013

La hauteur de pression du mercure = 4,5935

La hauteur réduite = 4,5843

Le chiffre placé sous la rubrique $H - l$ indique la hauteur à laquelle fut levé le tube mobile du manomètre avec son microscope et la règle y attachée, après introduction de la vapeur dans le tube fixe du manomètre. Cette hauteur restait stationnaire pendant toute l'expérience, chacun des 6 résultats de mesures de pression provenant de $H - l$ par addition des termes de correction figurant dans la dernière colonne et trouvés au moyen de la mise au point des oculaires à la vision nette, comme il a été déjà mentionné; la température du manomètre a varié entre $16,0^\circ$ et $16,1^\circ$.

Les 6 valeurs pour la différence de hauteur dans le manomètre varient de 4,5926 à 4,5943, l'écart le plus grand étant de $0,9 \mu$ de la moyenne. L'augmentation de la pression, qui semble avoir eu lieu au cours des premières cinq minutes, peut être due à une fusion trop étendue de la glace, car les deux évacuations consécutives et les formations de glace résultant de ces évacuations, ont réduit la pression à la valeur initiale. Le chiffre le plus bas dans le

tableau est la hauteur de mercure corrigée de la température et du degré de latitude.

Trois jours après cette expérience il en a été effectué deux nouvelles dont la première a donné trois déterminations, évacuation du ballon étant faite entre la première et la deuxième et entre la deuxième et la troisième. La hauteur de pression a été trouvée égale à $H-l+0,5 \mu$, $H-l+0,3 \mu$ et $H-l+0,4 \mu$ où $H-l = 4,5912$ mm. La température du manomètre était de $15,6^\circ$ C. Pour varier les conditions dans le manomètre, le tube mobile du manomètre a été abaissé de 5μ environ avant la deuxième expérience. Il a été effectué deux mesures avec évacuation du ballon après la première; elles ont donné à la hauteur de pression les valeurs $H-l+5,5 \mu$ et $H-l+5,8 \mu$ où $H-l = 4,5865$ mm. La température du manomètre était de $15,7^\circ$ C.

Les corrections des divisions de la règle étant ajoutées, les trois expériences donnent les valeurs moyennes suivantes pour la pression de la vapeur d'eau, mesurée en mm de mercure réduits:

$$4,5875 \quad 4,5861 \quad 4,5865 \text{ mm.}$$

$$\text{La moyenne} = 4,5867 \text{ mm.}$$

SCHEEL et HEUSE ont trouvé pour l'eau, à la température du point de fusion de la glace à la pression de l'atmosphère et humectée d'eau saturée d'air atmosphérique, la pression de vapeur de $4,5788$ mm,¹ donc $7,9 \mu$ inférieure à la susdite pression de vapeur à la température du triple point, trouvée par moi. La différence est de 3μ plus grande que celle à laquelle on pouvait s'attendre. Cependant je ne considère pas la valeur que j'ai trouvée comme une valeur définitive, et c'est pourquoi j'ai l'intention de reprendre les

¹ SCHEEL et HEUSE *Annalen der Physik*, tome 29, page 729, 1909.

recherches quand j'aurai perfectionné le manomètre; mais j'attache une grande importance à l'invariabilité des résultats des trois expériences et à la netteté avec laquelle la même pression s'est rétablie, après qu'on l'avait provisoirement abaissée par une congélation de l'eau.

Pour avoir la certitude que les trois phases se produisent, il sera rassurant d'avoir équilibre de température dans le ballon *A*. Après la dernière des expériences susmentionnées j'ai entouré tout le ballon de glace, ce qui a causé un abaissement de pression de 3μ . Cependant on peut craindre par cette disposition que la pression ne soit trop faible par suite de ce que la température de la glace extérieure est inférieure — seulement de $1/100^\circ$ il est vrai — à celle du triple point. Pourtant on pourra certainement écarter cette inexactitude en remplaçant le ballon *A* par un vase de DEWAR.

Il n'existe guère une température constante qu'on puisse s'attendre à produire plus exactement que celle qui réside dans un espace où l'on a rempli les conditions nécessaires pour que l'eau se trouve à son triple point. La pression est constante et l'on possède les meilleures conditions pour avoir de l'eau pure parce que l'eau n'est au contact avec d'autres corps étrangers que les parois du réservoir¹. Dans une détermination du zéro d'un thermomètre il peut se former des doutes sur la pureté de la glace et par là sur son point de fusion. Au moyen du triple point on peut examiner la glace à cet égard de la manière suivante: L'un des tubes d'un manomètre sensible est alternativement mis en communication avec l'un ou l'autre de deux réservoirs, contenant tous les deux de l'eau

¹ Selon M. L. DUNOYER l'eau qui se congèle dans le vide dégage la totalité de gaz dissous. L. Dunoyer: *Journal de Physique et le Radium*, tome 9, pages 1—12, 1928.

pure. L'un des réservoirs est entouré de la glace qu'on veut étudier, et l'on produit dans l'autre la pression du triple point. En changeant les communications avec les deux réservoirs et en observant la modification de pression on pourra déterminer la position du point de fusion de la glace examinée par rapport au triple point.

Pour une telle recherche on pourrait réunir les deux

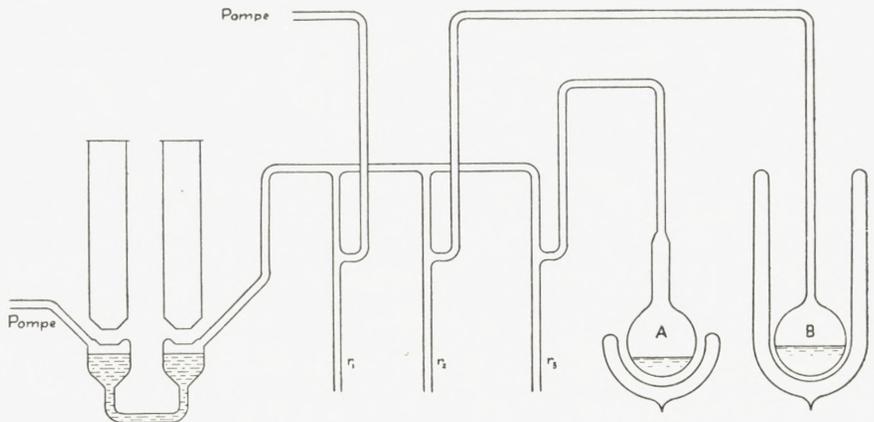


Fig. 7.

réservoirs d'eau *A* et *B* et la pompe avec le manomètre de la manière démontrée dans la figure 7, où chacun des trois tubes *r* communique avec son réservoir de mercure mobile, par lesquels on peut établir les barrages et les communications nécessaires. Si l'on emploie un manomètre à contact optique, les deux microscopes peuvent être fixes, de sorte que seulement les oculaires sont mobiles. Les petites modifications de pression qu'on aura à observer, se trouvent seulement par des déplacements mesurables des oculaires, et l'on peut alors trouver la différence de pression dans *A* et *B* indépendamment de la capillarité avec une exactitude d'une fraction de 1μ qui donnera la différence de température avec une exactitude de $1/1000^\circ$.

9. Comparaison du manomètre à contact optique avec d'autres manomètres sensibles.

Lord RAYLEIGH¹ a construit, comme on le sait, un manomètre à inclinaison, formé de deux tubes communiquants dans lesquels il a été fondu des pointes de verre, visant vers les surfaces de mercure. Le montage du manomètre peut tourner autour d'un axe horizontal, et au moyen d'un miroir, fixé sur le manomètre, on peut observer l'inclinaison du plan, parallèle à l'axe de rotation et passant par les extrémités des pointes. Il faut prendre soin dans chaque mesure que les pointes touchent presque les surfaces (RAYLEIGH) ou qu'elles soient toutes les deux à la même distance minime de celles-ci (SCHEEL et HEUSE²). A des pressions égales le plan en question est horizontal. Une différence de pression peut être trouvée sur la base de la distance mutuelle connue des pointes et d'une mesure de l'inclinaison qui place les pointes dans leurs positions normales par rapport aux surfaces. SCHEEL et HEUSE ont modifié l'instrument primitif de RAYLEIGH de façon à l'employer dans les mesures de la pression maximum de la vapeur d'eau à 0° C. Avec cet instrument on peut mesurer les pressions d'une colonne de mercure jusqu'à 5 mm de hauteur.

A côté de ce manomètre je citerai, à titre d'avantages du manomètre à contact optique, la mesure directe de la hauteur de la colonne de mercure, la grande exactitude dans la mise au point sur les surfaces de mercure, la possibilité d'une protection presque complète contre le rayonnement ou d'un placement des tubes de manomètre

¹ Lord RAYLEIGH: Phil. Trans, tome 196, page 190 et 205, 1901.

² SCHEEL et HEUSE: Zeitschrift für Instrm.kunde, tome 29, page 344, 1909 et tome 30, page 45, 1910.

dans un bain. Dans le manomètre de RAYLEIGH il faut trouver avec une très grande exactitude la distance mutuelle des deux pointes, détermination qui est rendue encore plus difficile par la réfraction que produisent les parois du manomètre.

Pour la mesure de pressions un peu plus élevées, jusqu'à la pression de 24 mm de mercure, SCHEEL et HEUSE ont construit un manomètre dont l'un des tubes est fixe tandis que l'autre peut être déplacé le long d'une glissière. Pour permettre le déplacement mutuel des tubes du manomètre ils communiquent par l'intermédiaire d'un tube de verre flexible d'une longueur de 1 m, et on trouve la modification de hauteur du tube en mesurant l'inclinaison qui est donnée, par suite du déplacement du tube mobile, à une plaque, munie d'un miroir, et reposant sur la prolongation des extrémités supérieures des tubes du manomètre. De cette manière on peut mesurer directement une pression jusqu'à 5 mm de mercure. Pour qu'il soit possible de mesurer des pressions aussi élevées que le permet la flexibilité du susdit conduit, il est placé une plaque de verre d'une épaisseur connue au-dessous de l'un des bouts de la plaque susmentionnée, et l'épaisseur choisie doit être telle que l'inclinaison de la plaque soit assez petite pour pouvoir se mesurer à l'aide du miroir et de la règle. J'ai obvié aux inconvénients du long conduit entre les tubes de manomètre en le remplaçant par un tube de caoutchouc, plongé dans le mercure et permettant un domaine de pression de 40 mm de mercure.