

N° 190.

COLLECTION ARMAND COLIN
(Section de P. y. ique)

*Mesure
des
Températures*

par

G. RIBAUD

Membre de l'Institut
Professeur à la Sorbonne

83 Figures

3^e ÉDITION



LIBRAIRIE ARMAND COLIN
103, Boulevard Saint-Michel, PARIS

1948

Tous droits réservés.



AVANT-PROPOS

La technique de la mesure des températures embrasse tous les domaines de la physique ; elle se rattache aussi bien à l'optique qu'à l'électricité et à la thermodynamique ; elle met en œuvre les instruments et des méthodes de mesure extrêmement variés et, à ce titre, elle compte parmi les plus instructives que l'on puisse donner en exemple aux jeunes chercheurs et praticiens.

Nous ajouterons qu'elle prend chaque jour une place plus importante, non seulement au laboratoire, mais dans la pratique industrielle courante où les qualités toujours plus grandes demandées aux produits fabriqués nécessitent un contrôle de plus en plus minutieux des températures.

Signalons enfin, sans insister, la rapide évolution de cette technique de la thermométrie, à laquelle les précurseurs qu'ont été H. Le Chatelier et Féry ont apporté en France une très large contribution. L'ancien ouvrage de Le Chatelier sur la mesure des températures élevées, dont la lecture attachante reste pleine d'enseignements, est malheureusement épuisé, ainsi que les traductions qui en ont été faites. Il faut bien reconnaître que cet ouvrage, ainsi que d'autres parus plus récemment à l'étranger, appellent de nombreuses additions pour être mis à jour.

Le volume qui apporte la collection Armand Colin nous a paru devoir présenter avant tout un caractère pratique ; le lecteur y trouvera le principe des appareils de mesure



et les méthodes actuellement en usage ; toutefois le cadre limité de ce volume ne nous a pas permis de donner une description détaillée des multiples instruments livrés actuellement par les constructeurs (1). Nous nous sommes borné à en faire une étude d'ensemble avec la critique de leur usage.

En ce qui concerne la mesure des hautes températures l'ouvrage renferme la partie essentielle d'un cours professé à la Faculté des Sciences de Paris pendant l'année scolaire 1933-1934 (2) ; nous y avons joint quelques paragraphes sur la thermométrie des basses et moyennes températures. Enfin, sans entrer dans les détails, nous avons cru devoir y faire figurer quelques développements sur l'emploi du thermomètre à gaz pour la fixation de l'échelle thermodynamique des températures.

Nous nous sommes enfin astreint à mettre ce volume en harmonie avec les textes qui fixent l'échelle internationale des températures et à bien préciser la technique de réalisation d'une telle échelle. En ce qui concerne le domaine des températures élevées, où cette technique nécessite la mise en œuvre de moyens assez coûteux, nous croyons rendre service aux divers laboratoires en leur signalant que, grâce à des subventions de la Compagnie du Gaz de Paris, le Laboratoire des Hautes Températures est outillé pour réaliser les divers points fixes thermométriques internationaux avec toute la précision désirable.

(1) On trouvera ailleurs (*Traité de Pyrométrie Optique*, Revue d'optique, édit.) cette description pour les types les plus courants de pyromètres optiques.

(2) Je suis heureux de remercier ici M. Lajeat, Ingénieur à la Compagnie du Gaz de Paris, dont les notes prises au Cours m'ont été précieuses pour la rédaction de ce volume. Je remercie également la *Revue d'optique* qui nous a gracieusement prêté un certain nombre de clichés.



MESURE DES TEMPÉRATURES

CHAPITRE PREMIER

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES

1. Systèmes thermométriques. — Tout système thermométrique suppose le choix de deux points fondamentaux, définis avec autant de précision que possible.

Pour les trois systèmes encore en usage ¹, ces deux points fondamentaux sont : la fusion de la glace et l'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique normale, et les valeurs des températures admises pour ces points fondamentaux, dans les trois systèmes, sont données par le tableau suivant :

	CENTÉSIMAL	FAHRENHEIT	RÉAUMUR
Glace fondante	0	32	0
Ébullition de l'eau	100	212	80

5 degrés C = 9 degrés F = 4 degrés R

Dans la suite, nous ne ferons état que du système Centésimal ; dans ce système nous représenterons les



températures par un nombre accompagné de la notation °C (1 063° C).

2. **Échelles thermométriques.** — A partir des points fondamentaux ci-dessus, on peut définir une échelle thermométrique en faisant appel à un phénomène physique, fonction de la température, et en convenant d'admettre une proportionnalité entre la variation du phénomène et celle de la température. De façon générale, en écrivant que les variations du phénomène entre t° et 0° et entre 100° et 0° sont respectivement proportionnelles aux variations de températures t° et 100° , il vient :

$$[1] \quad \frac{t}{100} = \frac{\varphi_t - \varphi_0}{\varphi_{100} - \varphi_0}$$

Les premiers thermomètres utilisés dans la pratique ont été des thermomètres basés sur la *dilatation apparente d'un liquide* (mercure, alcool,...) dans une enveloppe solide, le verre en général ; les variations apparentes de volume sont lues sur une tige capillaire supposée rigoureusement cylindrique et graduée en divisions d'égale longueur. Dès lors si n_0 , n_{100} , n sont les divisions d'affleurement dans la glace fondante, l'eau bouillante et un bain de température t , on a :

$$\frac{t}{100} = \frac{n - n_0}{n_{100} - n_0} = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0}$$

V_0 , V_{100} , V représentant respectivement les volumes *apparents* du liquide dans l'enveloppe aux températures 0, 100 et t .

Il apparaît immédiatement que l'échelle ainsi définie, pour un même liquide (le mercure, par exemple), dépendra de la nature de l'enveloppe ; une telle enveloppe se trouve avoir en effet une dilatation propre qui se retranche de la dilatation vraie du liquide.



Divers thermomètres à mercure faits de verres différents n'auront pas des échelles concordantes ; à plus forte raison des thermomètres faits de liquides différents montreront des divergences encore plus notables.

3. **Thermomètre à gaz.** — Un gaz, utilisé comme corps thermométrique, présente sur un liquide l'avantage d'avoir un coefficient de dilatation plus élevé, ce qui rend moins importante la valeur relative de la dilatation de l'enveloppe. Aussi a-t-on songé depuis longtemps à réaliser des thermomètres à gaz pour la définition d'une échelle de températures ; étant entendu d'ailleurs que la dilatation de l'enveloppe peut être mesurée et qu'il devient possible de l'éliminer de façon à ne faire apparaître que la dilatation *vraie* du gaz.

Pour un thermomètre à gaz on peut considérer, comme phénomène thermométrique, soit l'accroissement de volume du gaz sous pression constante, soit l'accroissement de pression sous volume constant. Pour diverses raisons, en particulier à cause de la difficulté de mesurer avec précision un accroissement de volume, on a reconnu préférable d'adopter le thermomètre à gaz à volume constant (8).

Si h_0 , h_{100} et h sont les hauteurs de mercure lues sur le manomètre aux températures 0, 100 et t , l'équation qui définit la température t s'écrit :

$$\frac{t}{100} = \frac{h - h_0}{h_{100} - h_0}.$$

En réalité, il convient de ramener les lectures des hauteurs de mercure à ce qu'elles seraient si l'espace occupé par le gaz en dehors de l'enceinte (espace nuisible) était nul et si la dilatation de l'enveloppe du réservoir était négligeable (9).

Malheureusement, ici encore, les indications d'un tel



thermomètre dépendent de la nature du gaz employé et même de la pression de remplissage h_0 (11).

Pour tourner la difficulté, la première Conférence générale des poids et mesures, réunie à Paris en 1889, avait convenu d'adopter, comme échelle internationale normale, l'échelle fournie par un *thermomètre à hydrogène* à volume constant, dont la pression de remplissage à 0° est égale à 1 mètre de mercure normal.

Il n'en subsiste pas moins qu'une telle échelle ne donne pas entièrement satisfaction, elle reste subordonnée au choix d'un corps thermométrique et aux conditions d'emploi de ce corps au sein du thermomètre.

4. Échelle thermodynamique (Lord Kelvin). — Pour obtenir une échelle thermométrique indépendante du corps thermométrique utilisé, Lord Kelvin a proposé d'adopter une échelle basée sur le principe de Carnot.

Si l'on fait parcourir à un fluide un cycle de Carnot formé de deux portions d'isothermes AB et CD (fig. 1) et de deux portions d'adiabatiques BC et DA ; si

Q_1 et Q_2 sont les quantités de chaleur mises

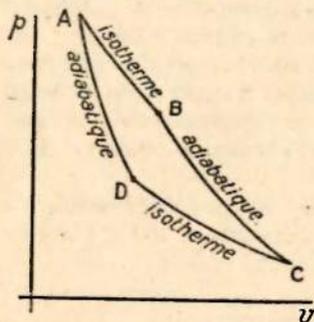


FIG. 1.

en jeu le long des deux portions d'isothermes, le principe de Carnot nous enseigne que le rapport de ces quantités de chaleur ne dépend que des températures des isothermes, il est indépendant de la nature du fluide qui parcourt le cycle.



Lord Kelvin propose d'appeler températures thermodynamiques T_1 et T_2 de ces deux isothermes les grandeurs définies par la relation :

$$[2] \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Au repérage d'une température fourni par un instrument conventionnel, on substitue ainsi une grandeur physique parfaitement définie et mesurable.

Proposons-nous d'appliquer la définition de la température thermodynamique au cas d'un gaz.

Pour un gaz quelconque, on peut définir la température centigrade au moyen de la relation générale 1 dans laquelle la fonction sera par exemple la pression p du gaz à volume constant ; on obtient alors :

$$\frac{t}{100} = \frac{p - p_0}{p_{100} - p_0} \quad \text{ou} \quad p = p_0 (1 + \beta t)$$

avec l'expression suivante du coefficient β :

$$\beta = \frac{p_{100} - p_0}{100 p_0}$$

Un tel coefficient (coefficient thermométrique) peut être mesuré pour divers gaz ; l'expérience a montré que, pour un gaz réel, ce coefficient dépend de la nature du gaz et de la pression de remplissage p_0 ; mais elle montre également qu'à condition d'opérer sous une pression initiale suffisamment faible, le coefficient β tend, pour tous les gaz, vers une même valeur :

$$\beta_0 = \frac{1}{273,16}$$

ce que l'on convient d'exprimer en disant que les gaz pris sous pression suffisamment réduite (*gaz parfaits*) ont même loi de dilatation et par suite fournissent une même échelle centigrade dans laquelle la température est donnée par la relation :

$$[3] \quad pv = p_0 v_0 (1 + \beta_0 t)$$



Appliquons maintenant à un tel gaz parfait la définition de l'échelle thermodynamique donnée par l'équation 2.

Pour calculer la quantité de chaleur Q_1 mise en jeu le long de l'isotherme AB (fig. 1), on peut calculer le travail correspondant, ce qui fournit, en tenant compte de l'équation 3 :

$$Q_1 = \int_{AB} p dv = p_0 v_0 (1 + \beta_0 t_1) \text{Log} \frac{p_A}{p_B}.$$

De même :

$$Q_2 = \int_{CD} p dv = \nu_0 v_0 (1 + \beta_0 t_2) \text{Log} \frac{p_D}{p_C}.$$

t_1 et t_2 représentant les températures centigrades des isothermes AB et CD, p_A, p_B, \dots les pressions correspondant aux points A, B, ...

Si nous écrivons d'autre part les relations qui traduisent le fait que A et B sont sur une même isotherme, B et C sur une même adiabatique, ...

$$\begin{aligned} p_A v_A &= p_B v_B & p_B v_B^\gamma &= p_C v_C^\gamma \\ p_C v_C &= p_D v_D & p_D v_D^\gamma &= p_A v_A^\gamma; \end{aligned}$$

on tire immédiatement de ces relations :

$$\frac{p_A}{p_B} = \frac{p_C}{p_D}.$$

Dès lors, le rapport Q_1/Q_2 , s'écrit après simplification :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1 + \beta_0 t_1}{1 + \beta_0 t_2} = \frac{t_1 + 273,15}{t_2 + 273,16}.$$

expression qui, rapprochée de [2], conduit à la conclusion importante suivante : l'échelle thermodynamique se confond, au changement d'origine près, avec l'échelle centigrade d'un gaz supposé parfait.

Pour avoir la température thermodynamique T, il suffit d'ajouter à la température centigrade t fournie



par un gaz parfait la quantité $273^{\circ},16$. Dans la suite, nous représenterons les températures thermodynamiques par la notation $^{\circ}\text{K}$ (degrés Kelvin); par exemple la température d'ébullition de l'eau sous la pression normale pourra s'écrire indifféremment: 100°C ou $373,16^{\circ}\text{K}$.

En 1919, la loi française a substitué à l'ancienne échelle normale, basée sur le thermomètre à hydrogène, une autre échelle définie au moyen d'un gaz parfait :

« Le degré centésimal est la variation de température qui produit la centième partie de l'accroissement de pression que subit une masse d'un gaz parfait quand, le volume étant constant, la température passe du point 0° (température de la glace fondante) au point 100° (température d'ébullition de l'eau) tels que ces deux points ont été définis par la Conférence générale des poids et mesures de 1889 et par celle de 1913. » (Loi du 2 avril 1919).

En pratique, on définira l'échelle thermodynamique au moyen du thermomètre à gaz; comme le gaz utilisé ne peut pas être considéré comme parfait, on introduit, sur l'échelle fournie par un tel thermomètre, les corrections qui tiennent à l'imperfection du gaz. Nous verrons plus loin comment ces corrections peuvent être calculées avec une sécurité suffisante, et nous donnerons leur ordre de grandeur pour les divers thermomètres à gaz (11).

5. Points fixes internationaux. — Le thermomètre à gaz est un instrument peu maniable, nécessitant un outillage important. Pour concrétiser l'échelle de températures donnée par ce thermomètre, pour permettre la comparaison des échelles établies dans divers laboratoires, pour permettre enfin la réalisation com-



mode de températures repères, on a été amené dès 1887, sur la proposition de H. Le Chatelier, à choisir des points fixes (températures de fusion, de solidification ou d'ébullition de corps purs) susceptibles d'être reproduits avec précision.

Les divers laboratoires nationaux qui, actuellement, possèdent un thermomètre à hélium se sont mis d'accord sur un certain nombre de points fixes à l'occasion de la 7^e Conférence générale des poids et mesures réunie à Paris en 1927.

Aux très basses températures, quelques divergences subsistant encore ¹, on s'est limité à la température d'ébullition de l'oxygène sous la pression normale, réservant pour plus tard la fixation des températures inférieures.

Les points fixes actuellement admis pour fixer l'échelle internationale pratique des températures sont les suivants (en degrés C) :

Ébullition de l'oxygène : — 182°97 ; fusion de la glace : 0°00 ; Ébullition de l'eau : 100°00 ; Ébullition du soufre : 444°60 ; Solidification de l'antimoine : 630°5 ; de l'argent : 900°5 ; de l'or : 1 063°0.

On remarquera qu'aucune température repère n'est donnée au delà du point de fusion de l'or, en raison des difficultés des mesures aux températures très élevées (7).

6. Instruments pratiques d'interpolation des températures. Domaines d'utilisation. — Les températures repères précédentes étant fixées, il importait de préciser les instruments pratiques susceptibles de servir à l'interpolation entre ces températures repères fournies par le thermomètre à gaz.



¹ Ces divergences ne portent que sur quelques centièmes de degré. Voir sur ce sujet les restrictions formulées par Thomson, *Physica*, 9, p. 385-409 (1929).

UTMHEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

Notons tout de suite que le thermomètre à mercure n'est plus utilisé comme instrument de précision ; il est d'usage beaucoup moins commode que le thermomètre à résistance de platine sur lequel nous aurons l'occasion de revenir. Il fournit une précision nettement inférieure et oblige à des corrections longues, difficiles et souvent incertaines (déplacement du zéro, colonne émergente, pressions extérieure et intérieure) ; son domaine d'utilisation est en outre beaucoup moins étendu que celui du thermomètre à résistance de platine, en particulier aux basses températures.

Pour tout l'intervalle qui va du zéro absolu jusqu'à 660° C, l'instrument d'interpolation utilisé est le *thermomètre à résistance de platine*, basé sur la variation de résistance d'un fil de platine en fonction de la température. La comparaison d'un tel thermomètre avec le thermomètre à hélium a montré qu'entre 0 et 660° C la résistance pouvait être représentée, en fonction de la température centigrade t fournie par le thermomètre à gaz (ramené à l'état parfait) et avec toute la précision que comporte chacun des deux instruments, par une formule à trois termes :

$$[4] \quad R = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

les trois constantes R_0 , A et B étant déterminées par des mesures aux trois températures repères 0°, 100° et 444°60.

Pour les températures comprises entre -190° et 0°C, l'interpolation est fournie, avec toute la précision désirable, par la formule :

$$[5] \quad R = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)]$$

dans laquelle les constantes R_0 , A et B sont celles déterminées précédemment et la constante additionnelle déterminée au moyen du point d'ébullition



de l'oxygène ($-182^{\circ},97$)¹. Au delà de 660° C, on a renoncé à utiliser le thermomètre à résistance de platine, l'altération du platine risquant d'amener des variations sensibles de sa résistance électrique.

Entre 630 et 1063° C, l'interpolation est obtenue grâce au couple platine — platine rhodié à 10 % de rhodium (Le Chatelier); ici encore la force électromotrice de ce couple peut être représentée, en fonction de la température t fournie par le thermomètre à gaz, par une formule à trois termes : $e = a + bt + ct^2$ dans laquelle les trois constantes a , b , c seront fournies par les points de solidification de l'antimoine ($630^{\circ},5$), de l'argent ($960^{\circ},5$) et de l'or (1063° C).

Enfin aux températures supérieures à 1063° C, les températures seront définies grâce aux lois du rayonnement, lois qui ont une base théorique extrêmement solide et qui fournissent directement une valeur de la température thermodynamique. Bornons-nous à signaler dès maintenant que seul le *pyromètre optique monochromatique* a été retenu comme instrument d'extrapolation, la valeur provisoire admise pour la constante C_2 de la loi de Wien étant prise égale à $14\,320$ micron-degré.

Nous avons rassemblé dans le tableau I les points fixes repères de l'échelle internationale des températures, avec les domaines d'utilisation des divers instruments d'interpolation et les points fixes servant à leur étalonnage.

7. Extrapolation aux températures élevées au moyen des lois du rayonnement du corps noir. — Le thermomètre à gaz ne permet pas de dépasser pratiquement



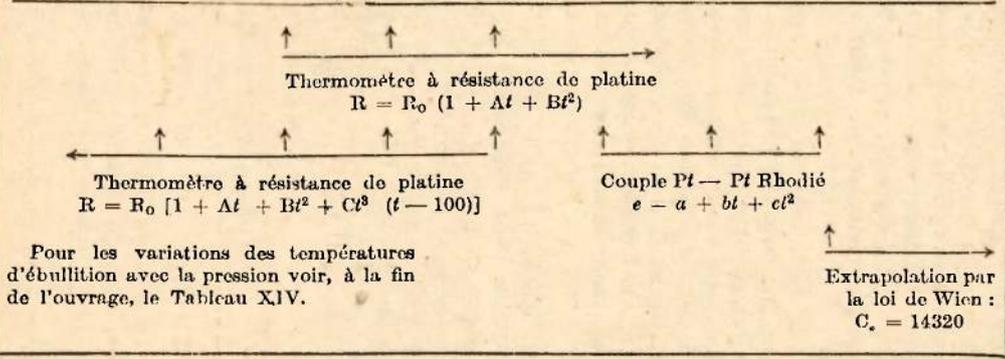
¹ HEUSE et OTTO [Ann. der phys., 14, p. 181 (1932)] ont toutefois signalé entre l'échelle ainsi définie et l'échelle thermodynamique des différences dont la valeur maximum est $0,04^{\circ}$ au voisinage de -80° .



Généralité de la mesure des températures.

TABLEAU I. — Températures centigrades des points fixes repères internationaux et instruments d'interpolation.

Ébullition de l'oxygène	Fusion de la glace	Ébullition		Solidification		
		de l'eau	du soufre	de l'antimoine	de l'argent	de l'or
- 182,97	0,00	100,00	444,60	630,5	960,5	1 063,0



Pour les variations des températures d'ébullition avec la pression voir, à la fin de l'ouvrage, le Tableau XIV.

2

ÉCHELLES THERMOMÉTRIQUES

17

1 100° C ; il restait donc à extrapoler une échelle de températures au delà du point de fusion de l'or.

Pour mieux préciser les difficultés que l'on rencontre dans ce domaine, nous allons passer très rapidement en revue les diverses méthodes mises en œuvre pour prolonger, pratiquement, l'échelle du thermomètre à gaz.

Dès 1907, dans un très important travail sur les points de fusion du palladium et du platine, Waidner et Burgess ¹ ont été amenés à utiliser le couple platine-platine rhodié comme moyen d'extrapolation au-delà des températures fournies par le thermomètre à hydrogène. Les résultats obtenus pour le point de fusion du palladium diffèrent suivant la formule d'extrapolation utilisée ; alors que les deux formules :

$$e = a + bt + ct^2 \quad \text{et} \quad e = mt^n$$

sont d'accord jusqu'à 1 200° C, leur extrapolation à partir de cette température fournit des valeurs qui diffèrent entre elles de plus de 15°.

Waidner et Burgess ont en outre, dans leur travail, comparé l'extrapolation T_e fournie par le couple platine-platine rhodié, avec celle T_o que donnent les lois du rayonnement ; le rapprochement est indiqué dans le tableau II ($C_2 = 14\,320$).

TABLEAU II

	1 200°C	1 300°C	1 400°C	1 500°C	1 600°C	1 700°C
$T_o - T_e$	0	+3°	+9°	+18°	+31°	+51°

Il existe, on le voit, un écart très notable ; l'écart est bien d'ailleurs dans le même sens que celui fourni par la comparaison avec le thermomètre à azote. On est

¹ Waidner et BURGESS, Bur. Stand. Bull., 3, p. 163 (1907)



conduit à rejeter le couple thermoélectrique comme instrument d'extrapolation.

Une enceinte noire à température uniforme, dont le rayonnement est indépendant de la nature des corps placés à son intérieur, va nous permettre, grâce aux lois du rayonnement, d'extrapoler de façon pratique l'échelle thermodynamique jusqu'aux températures les plus élevées.

Pour effectuer cette extrapolation on peut utiliser, soit la loi de Planck qui fixe le rayonnement monochromatique du corps noir (77), soit la loi de Stefan qui donne le rayonnement total (74, 107). Les mesures de rayonnement total sont entachées d'erreurs notables (124). Les mesures de rayonnement monochromatique, faites dans le spectre visible au moyen du pyromètre optique monochromatique, comportent au contraire toute la précision des mesures photométriques et ce sont elles que l'on a choisies pour définir l'échelle optique aux températures élevées.

On a convenu de prendre pour température de départ la température de fusion de l'or. Il importait, pour fixer l'échelle internationale, d'adopter une valeur déterminée de la constante C_2 . La Conférence générale des poids et mesures de 1927 a décidé d'adopter la valeur $C_2 = 14\,320$ micron-degré.



CHAPITRE II

THERMOMÈTRE A GAZ

8. Description. — Bien que le thermomètre à gaz ne soit pas un appareil de mesures couramment employé dans la pratique, et que son usage se trouve limité à un petit nombre de laboratoires, spécialement outillés, il n'en reste pas moins que cet appareil est fondamental puisque, comme nous l'avons indiqué, c'est lui qui sert de base à la fixation de l'échelle thermodynamique des températures.

Sans entrer dans les détails pratiques, nous croyons néanmoins utile d'en rappeler la description et la théorie, en précisant les diverses corrections à effectuer pour ramener ses indications à l'échelle thermodynamique. Nous nous limiterons au thermomètre à volume constant, le seul utilisé dans la pratique.

La figure 2 représente l'appareil réalisé par P. Chappuis au Bureau international des poids et mesures¹; le réservoir R, de forme cylindrique, contient le gaz; il est relié au manomètre BC par un tube capillaire dont le volume (espace nuisible) est de l'ordre de 0.5 cm^3 : les mesures de pression se font au cathé-

mètre et, pour faciliter les pointés des niveaux du



mercure, deux pointes de verre p_1 et p_2 sont amenées au voisinage immédiat de la surface ; la pointe p_2 sert en outre à reproduire dans toutes les expériences un volume de gaz constant. Le niveau du mercure est amené en p_2 grâce à un réservoir à mercure auxiliaire R' ; on peut parfaire le réglage au moyen d'une vis r' . Un robinet r fixé latéralement sur B permet le remplissage du réservoir. Nous n'insisterons pas sur les détails de remplissage, il nous suffira de rappeler que le gaz introduit doit être très soigneusement desséché.

Les appareils utilisés actuellement au Laboratoire cryogénique de Leyde et à la Reichsanstalt diffèrent un peu du précédent, mais par de simples détails ¹.

Le volume du réservoir peut être compris entre 100 et 1 000 cm³ ; les réservoirs de grand volume entraînent des difficultés dans la réalisation de l'uniformité de température, aussi ne les a-t-on guère utilisés que pour des mesures aux points 0° et 100°, en particulier pour la détermination du coefficient thermométrique (4). Pour les températures élevées, la difficulté de réaliser une température uniforme conduit à adopter des réservoirs de faible volume.

Jusqu'à 450° C le réservoir peut être fait en verre ². La silice fondue qui pourrait servir jusqu'à 1 000° C

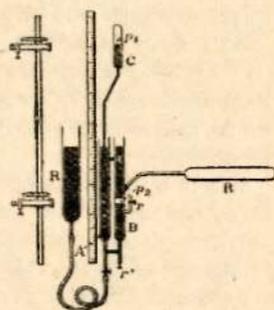


FIG. 2.

1. KEESOM et VAN DER HORST, *Proceed. Amsterdam*, 30, p. 870 (1927). — HEUSE et OTTO, *Ann. der Phys.*, 2, p. 1012 (1929). On définit avantageusement le niveau du mercure au moyen de contacts en platine traversant le verre du manomètre.
2. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 59 III.



doit être rejetée, car elle se laisse aisément traverser par l'hydrogène et l'hélium. Aux températures élevées, on adopte un réservoir en platine rhodié; l'hydrogène ne peut plus servir car il traverse très facilement le platine; on utilise l'azote ou mieux l'hélium pour lesquels le platine est imperméable jusqu'à 1 600° C.

En ce qui concerne le choix du gaz, il y a avantage à adopter un gaz qui se rapproche le plus possible de l'état parfait. L'hydrogène permet des mesures jusqu'au voisinage de -250° ; toutefois, à cette température, assez rapprochée de son point de liquéfaction ($-252^{\circ},78$), les corrections à effectuer pour ramener les indications à celles que fournirait un gaz parfait deviennent importantes (11) et, de ce fait, un peu incertaines.

L'hélium a l'avantage de pouvoir être utilisé jusqu'à quelques degrés au-dessus du zéro absolu (température de liquéfaction normale $-268^{\circ},7$); les corrections à lui faire subir sont notablement plus faibles que pour l'hydrogène (Tableau III, p. 27), aussi l'a-t-on adopté dans les laboratoires qui poursuivent actuellement la fixation de l'échelle thermodynamique aux très basses températures.

On peut atteindre des températures d'autant plus faibles que la pression de remplissage est plus basse; on y trouve en outre l'avantage de corrections plus petites, toutefois les mesures de pressions deviennent moins précises au fur et à mesure que la pression diminue; pratiquement, pour les mesures courantes, on n'est jamais descendu au-dessous de 20 cm de mercure (à 0°), exceptionnellement on a pu atteindre 12 mm (14).

Le coefficient de dilatation du réservoir, qui entre dans les termes correctifs, demande à être connu avec



quelque précision ; on le mesure au comparateur sur une tige faite de même substance que le réservoir ou sur le réservoir lui-même.

9. Corrections d'espace nuisible et de dilatation de l'enveloppe. — Nous désignerons par V_0 le volume du réservoir à 0° , par a son coefficient de dilatation, par v le volume de l'espace nuisible, par t la température centigrade de l'enceinte dans laquelle se trouve plongé le réservoir et par θ la température de l'espace nuisible. Soit p' la pression lue au manomètre.

Nous allons nous proposer de calculer la pression p qu'aurait le gaz s'il était tout entier dans le réservoir, supposé non dilaté et de volume V_0 , à la température t . En fait ce gaz se trouve occuper, sous la pression p' , un volume $V_0 (1 + at)$ à t° , augmenté du volume v de l'espace nuisible à θ° .

En appliquant à ces deux états l'équation des gaz, il vient immédiatement :

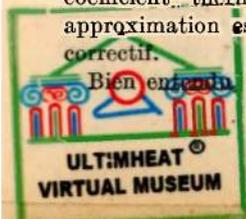
$$\frac{pV_0}{1 + \beta t} = \frac{p'V_0 (1 + at)}{1 + \beta t} + \frac{p'v}{1 + \beta \theta}$$

d'où l'on tire :

$$[7] \quad p = p' \left(1 + at + \frac{r}{V_0} \frac{1 + \beta \theta}{1 + \beta t} \right)$$

Autrement dit, à chaque température, il importe de remplacer la pression p' , lue directement au cathéto-
mètre, par la pression corrigée p donnée par l'équation
précédente. Les deux derniers termes de la parenthèse
sont des termes correctifs, faibles par rapport à l'unité ;
dans le dernier de ces termes on adoptera pour β le
coefficient thermométrique des gaz parfaits ; cette
approximation est justifiée dans le calcul d'un terme
correctif.

Bien entendu, la correction fournie par l'équation 7



devra être appliquée également aux pressions lues à 0° et à 100°.

10. Sensibilité de l'instrument. — Dans le thermomètre à gaz à volume constant, la pression p est reliée à la pression p_0 et à la température t par l'équation : $p = p_0 (1 + \beta t)$ qui fournit immédiatement :

$$[8] \quad dp = p_0 \beta \cdot dt \quad (\beta = 1/273).$$

Pour une pression de remplissage $p_0 = 1\,000$ mm, la variation de pression correspondant à une variation de température de 1° est égale à 3,7 mm ; si l'on admet que chaque pointé du niveau du mercure peut être fait au 1/1 000 de mm, étant donné que la mesure de p et p_0 nécessite 4 pointés, il en résulte que la précision maximum que l'on puisse atteindre dans la mesure d'une température est de l'ordre du 1/1 000 de degré. En réalité, cela suppose que la température de l'enceinte dans laquelle plonge le réservoir est définie avec cette précision ; cette condition ne semble réalisée que dans des bains liquides ou dans des thermostats comportant une agitation parfaite, elle ne l'est pas dans le cas d'un réservoir plongé dans une enceinte gazeuse chauffée électriquement comme celle que nous rencontrerons dans les mesures aux températures élevées (12).

L'équation 8 nous indique en outre que l'erreur en température croît, toutes choses égales, en raison inverse de la pression de remplissage p_0 .

11. Corrections à apporter à un thermomètre à gaz pour obtenir l'échelle thermodynamique. — Nous avons vu (4) que l'échelle thermodynamique se confondait avec l'échelle centigrade d'un thermomètre à gaz parfait et qu'un tel gaz parfait pouvait être considéré comme la limite vers laquelle tend un gaz réel lors-



qu'on abaisse suffisamment sa pression. Il importe donc de rechercher les écarts qui existent entre l'échelle fournie par un thermomètre à gaz réel sous la pression de remplissage p_0 à 0° et l'échelle que fournirait le même thermomètre dans lequel on réaliserait une pression de remplissage très faible.

Le calcul de ces écarts nécessite l'étude préalable du réseau d'isothermes du gaz, jusqu'à des pressions suffisamment basses pour que l'extrapolation sous une pression nulle puisse être faite avec sécurité ¹. Pour ce tracé des isothermes, pv

le système de coordonnées d'Amagat (pv, p). L'expérience montre que, du moins aux températures qui ne sont pas très basses, et pour des pressions qui n'excèdent pas une atmosphère, ces isothermes sont représentées assez exactement par des droites,

dont l'inclinaison dépend de la température. Sur la figure 3 nous avons tracé trois isothermes rectilignes correspondant aux trois températures 0° , 100° et t ; nous désignerons respectivement par σ_0 , σ_{100} et σ les pentes de ces trois droites.

Considérons un thermomètre rempli de gaz sous la pression p_0 (à 0° , point figuratif O'); si le thermomètre est utilisé à volume constant, cela revient à considérer les points A' et B' des isothermes qui se trouvent sur la droite CO' ; pour le thermomètre à

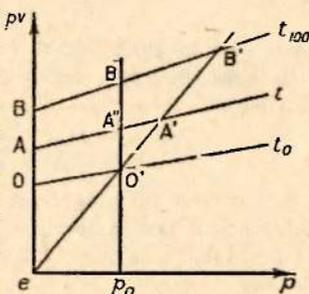


FIG. 3.

¹ I. HENSEL, *Ann. der Phys.*, 2, p. 1012-1030 (1929). — KEMMERLING, *Proc. Amsterdam*, 30, p. 970-979 (1928).



pression constante, il conviendrait de considérer les points A'' et B''.

La température t observée sur le thermomètre à volume constant est fournie par la relation :

$$\frac{t_{obs}}{100} = \frac{O'A'}{O'B'}$$

la température observée sur le thermomètre à pression constante est donnée par

$$\frac{t_{obs}^p}{100} = \frac{O'A''}{O'B''}$$

alors que la température fournie par le même gaz, sous pression nulle, serait obtenue au moyen de la relation :

$$\frac{t_{corr}}{100} = \frac{OA}{OB}$$

Les corrections à apporter aux mesures fournies respectivement par le thermomètre à pression constante et à volume constant sont données par les deux formules :

$$t_{corr} - t_{obs}^p = 100 \left(\frac{OA}{OB} - \frac{O'A''}{O'B''} \right)$$

$$t_{corr} - t_{obs}^v = 100 \left(\frac{OA}{OB} - \frac{O'A'}{O'B'} \right)$$

qui, en tenant compte des valeurs des pentes des isothermes, et remarquant que $OA = t \delta_0$, $OB = 100 \beta_0$, peuvent s'écrire :

$$t_{corr} - t_{obs}^p = 2,73 p_0 [t (\delta_{100} - \delta_0) - 100 (\delta - \delta_0)]$$

$$t_{corr} - t_{obs}^v = -p_0 [2,73 (t - 100) \delta_0 - 3,73 t \delta_{100} + (273 + t) \delta]$$

Les corrections, dans les deux cas, sont proportionnelles à la pression de remplissage p_0 . Pour un gaz donné, elles peuvent d'ailleurs être comparées à celles relatives à l'hélium par exemple, en utilisant une



méthode différentielle, mise en œuvre à Leyde, qui consiste à placer les deux réservoirs côte à côte dans un même bain et à mesurer directement la différence de leurs pressions.

Nous donnons, dans le tableau III, les valeurs moyennes des corrections obtenues, pour divers thermomètres, au Laboratoire cryogénique de Leyde et à la Reichsanstalt¹.

TABEAU III. — Corrections à faire subir à un thermomètre à gaz ($p_0 = 1$ mètre Hg) pour obtenir la température thermodynamique.

Température centigrade	Thermomètre à volume constant			Thermomètre à pression constante	
	Hélium	Hydrog.	Azote	Hélium	Azote
— 250	+ 0,037	+ 0,122			
— 200	+ 0,022	+ 0,063	+ 0,52		
— 183	+ 0,017	+ 0,047		+ 0,029	
— 150	+ 0,011	+ 0,032	+ 0,17	+ 0,015	
— 100	+ 0,005	+ 0,016	+ 0,05	+ 0,005	+ 0,40
0	0	0	0	0	0
+ 100	0	0	0	0	0
+ 300	+ 0,02	+ 0,05	+ 0,08	+ 0,006	+ 0,32
+ 500	+ 0,08	+ 0,16	+ 0,24	+ 0,014	+ 0,65
+ 700	+ 0,14	+ 0,30	+ 0,46		
+ 1 000	+ 0,26	+ 0,54	+ 0,83		+ 1,6
+ 1 100	+ 0,31	+ 0,65	+ 0,98		

On remarquera que ces corrections sont nettement moins élevées pour un thermomètre à volume constant que pour un thermomètre à pression constante rempli du même gaz ; sauf toutefois pour l'hélium aux tem-



1. CATH et KAMERLINGH ONNES, Comm. Leyde, n° 156a (1922). —
KEEBOER et KAMERLINGH ONNES, Comm. Leyde, n° 51a (1924). —
HOLBORN et OTTO, Z. s. f. Physik., 23, p. 77 (1924) ; 30, p. 320 (1924) ;

pératures élevées. On remarquera en outre que le thermomètre à hélium à volume constant peut être utilisé au delà de -250°C ; les corrections jusqu'à ces températures restent suffisamment faibles pour pouvoir être effectuées avec sécurité.

12. Le thermomètre à gaz aux températures élevées.

— Nous aurons l'occasion de donner plus loin quelques indications sur les thermostats destinés à fixer la température d'ébullition d'un liquide (soufre en particulier); de telles étuves ne présentent pas de difficultés de réalisation, par ailleurs le réservoir du thermomètre à gaz peut être plongé directement dans la vapeur, ce qui assure une excellente uniformité de température.

Ce fait explique pourquoi les déterminations des températures d'ébullition de la naphthaline, de la benzophénone et du soufre, effectuées au thermomètre à gaz par divers expérimentateurs, ont fourni des nombres en excellent accord; les écarts par rapport aux moyennes admises pour ces trois températures (Tab. XIV, p. 215) ne dépassent en aucun cas $0^{\circ},05$.

Il n'en va plus de même lorsqu'il s'agit de températures de fusion ou de solidification de métaux, c'est-à-dire pour toute la partie de l'échelle au-dessus de 450°C . Dans ce cas il ne peut pas être question de plonger le réservoir (en platine rhodié) directement au sein du métal en fusion¹, on doit tourner la difficulté en s'aidant d'un instrument repère (couple, thermomètre à résistance de platine) qui servira à transporter la température de fusion du métal sur le thermomètre à gaz.



1. L'insertion d'une enveloppe réfractaire entre le bain de métal et le réservoir du thermomètre entraînerait des corrections assez importantes et incertaines, en outre la quantité de métal à utiliser serait beaucoup trop grande.

Toutefois, étant donnée la difficulté de repérer une température au moyen du couple à beaucoup mieux que 1/10 de degré, étant données surtout les inégalités de température au sein du four dans lequel se trouve plongé le réservoir, de telles mesures comportent au total des erreurs qui dépassent 1/10 de degré.

Pour le point de solidification de l'antimoine, adopté comme point fixe international, l'accord entre les divers expérimentateurs est satisfaisant ; cela tient à la possibilité d'utiliser comme repère dans cette région (630°,5) le thermomètre à résistance de platine, qui fournit une précision supérieure à celle du couple thermoélectrique.

Aux températures supérieures à ce point de fusion de l'antimoine, la plus grosse difficulté tient au défaut d'uniformité de la température du four dans toute l'étendue du réservoir thermométrique ; pour s'en convaincre, il suffira de lire le mémoire de Day et Sosman ¹ dont nous résumons ici l'essentiel.

Le four utilisé est reproduit sur la figure 4. La chambre de chauffe est constituée par un tube T de magnésie à l'intérieur duquel est bobiné un fil E de platine de forte section.

Pour obtenir une plus grande uniformité de température dans la partie centrale du four, on ajoute, aux extrémités du premier enroulement, deux enroulements supplémentaires traversés par un courant indépendant. Enfin, pour éviter que les deux bouts du réservoir, qui rayonnent vers les parties froides du four, soient à une température plus basse que la partie centrale, on disposait des écrans de platine *d* au-dessus et au-dessous du réservoir. Pour définir le mieux possible la température du gaz, dans un dernier modèle de réservoir, on avait prévu une partie rentrante au sein de

¹ J. de Phys. 2, 727, 831 et 899 (1912).



laquelle était fixé l'un des couples destinés à repérer la température. L'expérience a d'ailleurs montré que ce couple présentait, par rapport aux couples disposés à l'extérieur du réservoir, des différences de température de 5° ; ce chiffre suffit à montrer la difficulté

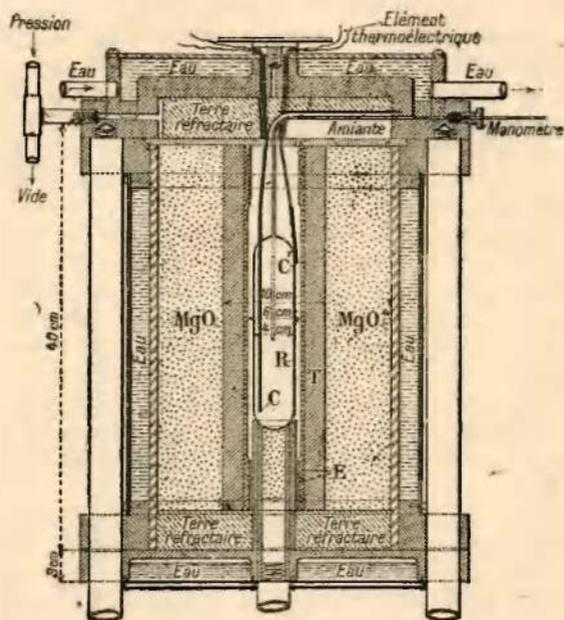
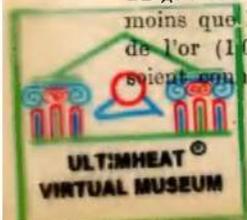


FIG. 4.

rencontrée dans l'évaluation de la température moyenne du gaz contenu dans le réservoir. Il semble bien néanmoins que les points de fusion de l'argent ($960^{\circ},5$) et de l'or ($1363^{\circ},0$) admis dans l'échelle internationale soient connus à mieux que $0^{\circ},5$.



Day et Sosman ont essayé de prolonger au delà de $1\ 063^{\circ}\text{C}$ l'échelle du thermomètre à gaz et de fixer en particulier le point de fusion du palladium. Malgré tout le soin apporté dans les mesures, la valeur admise par eux ($1\ 549 \pm 2^{\circ}\text{C}$) s'écarte beaucoup de la valeur ultérieure et beaucoup plus sûre ($1\ 555^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$) fournie par les lois du rayonnement.

13. Mesures au thermomètre à gaz aux basses températures. Points fixes. — Aux basses températures, l'échelle thermodynamique est définie par le thermomètre à gaz ; les seules mesures effectuées dans ces dernières années l'ont été au moyen du thermomètre à hélium qui présente l'avantage de pouvoir servir jusqu'à quelques degrés au-dessus du zéro absolu.

Dans beaucoup de cas d'ailleurs, la détermination des points fixes a été faite, non pas en plongeant directement le thermomètre dans le bain, mais en utilisant le thermomètre à résistance de platine comme instrument de comparaison ; la technique est identique à celle indiquée dans le paragraphe précédent pour les températures élevées ; elle a l'avantage de fournir, en même temps, une comparaison entre l'échelle du thermomètre à gaz et celle du thermomètre à résistance de platine (6) ¹.

Pour la fixation des températures d'ébullition des liquides tels que O_2 , N_2 , H_2 , le thermostat utilisé est un simple vase Dewar, contenant le liquide et surmonté d'un régulateur de pression ; un agitateur, plongé dans le liquide, assure l'uniformité de la température ; en réalisant des pressions réduites au-dessus du liquide, on pourra déterminer les températures



¹ Dans beaucoup de mesures récentes la même technique a permis également l'alignement de thermomètres à tensions de vapeur dont nous parlerons dans le prochain chapitre.

ULTIMHEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

d'ébullition sous ces pressions ; l'oxygène permet ainsi d'explorer l'intervalle qui va de -183 à -217°C (Tableau V, p. 40).

Pour le domaine qui s'étend de -217 à -253°C , Kamerlingh Onnes ¹ a proposé un thermostat rempli d'hydrogène refroidi et reproduit sur la figure 5. Le thermostat A est alimenté par de l'hydrogène gazeux, refroidi, provenant d'un vase Dewar B contenant de l'hydrogène liquide (introduit par le tube 1). L'éva-

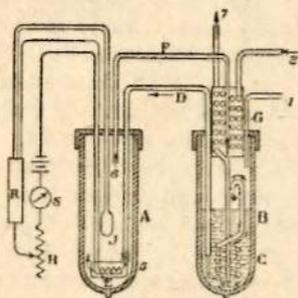


FIG. 5.

poration de cet hydrogène liquide est obtenue en introduisant de l'hydrogène gazeux par le tube 2 et en le faisant déboucher par un tube 3 au sein du liquide ; l'hydrogène évaporé circule dans un serpentin C au sein du liquide et, par un tube D à double enveloppe, est amené dans une boîte contenue dans le thermostat ;

sa température est alors d'environ -253°C . Au moyen d'une spirale E le gaz contenu dans la boîte est échauffé jusqu'à la température cherchée. La régulation est fournie par un thermomètre à gaz J qui commande un régulateur R à contact de mercure. Le gaz qui s'échappe du thermostat par le tube 6 à double enveloppe est envoyé dans un échangeur de température G, de façon à refroidir le gaz d'amenée introduit par le tube 2 et à éviter une trop rapide évaporation de l'hydrogène liquide ².

1. KAMERLINGH ONNES, *Communic. Leyde*, n° 151a (1917) ; n° 154c (1921).

2. Kamerlingh Onnes et J. Keesom, voir KEESOM, *Proceed. Amsterdam*, 32, p. 710 (1929).



Pour les températures comprises entre 0 et -150° (sublimation de CO_2 , solidification de Hg), le thermostat utilisé peut être constitué par un bain d'éther de pétrole, agité par un agitateur et refroidi par une circulation d'air liquide de vitesse réglable. L'emploi de l'éther de pétrole présente quelques inconvénients et dangers, aussi préfère-t-on employer des thermostats à bloc métallique ; on trouvera sur la figure 6 celui étudié par Lalande ¹. Il

comporte deux vases Dewar concentriques B et C dont l'intervalle est rempli par de l'air liquide ; à l'intérieur de C est suspendu le bloc thermostatique en cuivre rouge fait d'un cylindre creux E, entouré d'un serpentín F sur lequel est emmanché à force un manchon H muni d'un enroulement extérieur de chauffe L en constantan. Le serpentín F, fermé à son extrémité G et rempli de pentane, est prolongé à

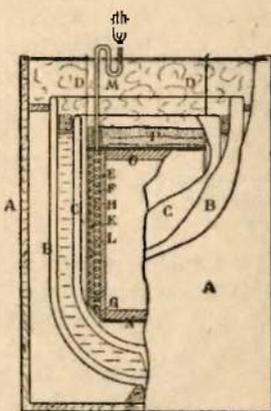


FIG. 6.

sa partie supérieure par un tube capillaire M contenant un peu de mercure ; il fonctionne comme régulateur agissant sur le chauffage de L. L'uniformité de température, complétée par deux disques de cuivre N et O, est assurée à $0,03^{\circ}$ près dans toute la cavité centrale ; la régulation de la température peut être réalisée à $0,05^{\circ}$ près.

Nous donnons ci-dessous (Tableau IV) les résultats des récentes déterminations de points fixes effectuées

par Lalande, *Bull. Bur. Int. Poids Mes. Paris* (1934) ; *J. Chimie Phys.*, 31, p. 456 (1934).
G. RIBAUD, *Mesure des températures.*

2

ULTIMHEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

au Laboratoire cryogénique de Leyde et à la Reichsanstalt¹ ; les températures de sublimation et d'ébullition sont relatives à 760 mm de mercure.

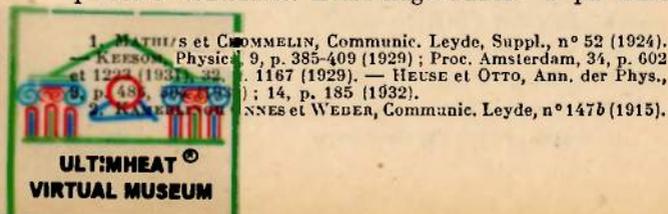
TABEAU IV. — Points fixes aux basses températures.

Corps	Changement d'état	Leyde	Reichsanstalt
Mercure	solidification		— 38,83 ₂
CO ²	sublimation		— 78,48 ₃
oxygène	ébullition	— 182,987	— 182,96 ₂
argon	—	— 185,66	
CO	—	— 191,47	— 191,48 ₁
azote	—	— 195,78	— 195,81 ₁
néon	—	— 245,02	
hydrogène (normal)	—	— 252,75 ₁	{ — 252,78 ₀ { — 252,81
hélium	—	— 268,88	

La Conférence internationale des poids et mesures de 1927 n'a retenu, pour fixer l'échelle internationale, que le point d'ébullition de l'oxygène, pris égal à —182°₉₇.

On trouvera à la fin de l'ouvrage quelques autres températures déterminées au laboratoire cryogénique de Leyde (points critiques et triples points).

14. Mesure des températures au voisinage du zéro absolu. — Au-dessous de la température d'ébullition de l'hélium sous la pression normale, le thermomètre à hélium doit être rempli d'hélium sous une pression inférieure à la tension de vapeur du liquide à la température considérée. Kamerlingh Onnes² a pu ainsi



atteindre 1,4° K avec un thermomètre à hélium dont la pression de remplissage à 0° n'était que de 12 mm. de mercure. Bien entendu des difficultés se présentent pour la mesure précise de telles pressions, même si l'on fait appel, comme l'auteur, au manomètre à fil chaud de Knudsen.

Pour extrapoler à des températures plus basses, Kamerlingh Onnes¹ a fait appel à la formule suivante (variante de la formule de Dupré) :

$$\log \frac{p}{p_c} = 2,5 \log \frac{T}{T_c} - 0,53 \frac{T}{T_c} + 0,59$$

qui relie la tension de vapeur p de l'hélium à la température absolue T (p_c , pression critique : 2,26 atm ; T_c , température critique : 5,25° K). La figure 7 montre l'allure de la

courbe ($\log \frac{p}{p_c}, \frac{T}{T_c}$) ; la partie en trait plein est fournie par le thermomètre à hélium, la partie en pointillé est extrapolée. Si l'on néglige la partie voisine de la température critique qui présente une légère courbure (présence du terme en $\log \frac{T}{T_c}$ dans la formule ci-

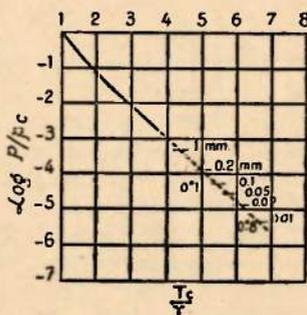


FIG. 7.

dessus), la courbe devient linéaire ; prolongée, elle fournit l'extrapolation aux très basses températures. Sous les pressions de vapeur 0,1 et 0,01 mm, les températures extrapolées sont respectivement égales

¹ Commun. Leyde, n° 159 (1922). Voir Amsterdam, 32, p. 1314 (1929).

à $0,94^1$ et $0,75^\circ$ K. Une telle extrapolation présente évidemment quelque imprécision, à laquelle s'ajoute l'incertitude qui provient de la mesure des pressions au manomètre à fil chaud.

En ce qui concerne la mesure des températures au-dessous de $0,8^\circ$ K, nous renvoyons le lecteur à un article de Keesom².

1. Sur la figure 7 lire $1^\circ,0$ au lieu de $0^\circ,1$.

2. KEESOM, J. Phys., 5, p. 384 (1934).



CHAPITRE III

THERMOMÈTRES A TENSION DE VAPEUR SATURANTE. — THERMOMÈTRES A DILATATION DE LIQUIDE.

15. Thermomètres à tension de vapeur saturante pour températures inférieures à la température ordinaire. — On a proposé depuis très longtemps l'emploi de la tension de vapeur saturante d'un liquide pur comme moyen de mesure des températures. La mesure est particulièrement simple et ne prête à aucune critique dans le cas des températures inférieures à la température ordinaire. L'application du principe de la paroi froide montre alors que la tension de vapeur dans tout l'instrument de mesure est égale à celle qui correspond au point le plus froid de l'instrument, c'est-à-dire ici le réservoir contenant le liquide émettant la vapeur.

On a pu donner à un tel thermomètre une forme simple se prêtant à des mesures de précision. L'appareil tout en verre (fig. 8) comporte une petite ampoule réservoir *a* de 0,5 à 1 cm³, reliée par un tube de verre étroit *bc* à un manomètre à mercure (diamètre 1 cm environ). On peut faire monter ou descendre le niveau du mercure dans le manomètre au moyen d'un récipient de hauteur réglable ; un robinet à



trois voies *e* relie la partie supérieure du manomètre, soit à l'air atmosphérique extérieur, soit à un récipient dans lequel se trouve réalisé un excellent vide.

Pour que la pression mesurée au manomètre corresponde bien à la tension maximum du liquide à la température à mesurer, il importe évidemment qu'il reste toujours du liquide non vaporisé dans l'ampoule *a* ; il faut en outre que la ligne de séparation du liquide et de sa vapeur soit située à l'intérieur de l'enceinte.

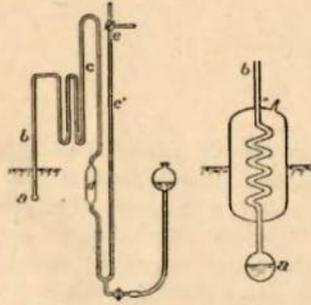


FIG. 8.

Afin d'éviter que des points autres que le réservoir *a* ne se trouvent accidentellement à une température inférieure à celle à mesurer, en particulier dans le cas de bains liquides à températures très basses (gaz liquéfiés), on a proposé d'ajouter entre *a* et *b*, au niveau d'afflement de l'instrument

dans l'enceinte, un récipient auxiliaire en verre, vidé et soudé en deux points du tube de sortie.

L'ampoule *d*, de volume 50 cm³ environ, permet de s'assurer que la vapeur utilisée dans l'instrument ne renferme pas d'impuretés plus difficilement condensables. Pour effectuer ce contrôle, il suffit de faire, pour une même température, deux mesures de pression, l'une dans laquelle l'ampoule *d* est remplie de vapeur, l'autre avec l'ampoule pleine de mercure.



16 Liquides utilisés. Relation entre la tension de vapeur saturante et la température. — Un tel thermomètre peut être comparé au thermomètre à hélium, de

façon à établir la relation entre la tension maximum de la vapeur et la température (13); l'expérience montre que, pour les divers corps indiqués dans le tableau V, la tension maximum p peut se représenter en fonction de la température absolue T par une formule analogue à la formule classique de Dupré, à laquelle on ajoute un terme en T :

$$\log_e p = -\frac{a}{T} + b \log_e T - cT + d$$

Dans le tableau V, on trouvera les valeurs correspondantes de p et de T , pour divers corps choisis de façon à couvrir toute l'échelle de températures, depuis $+25$ à -210°C ¹. On remarquera le fait général que, pour un thermomètre à vapeur saturante, la sensibilité ne reste pas constante, la variation de pression correspondant à une variation de température de 1° décroît lorsque la température s'abaisse; pour C^2H^4 et O^2 au voisinage de leur température d'ébullition normale, les variations de pression sont respectivement de 45 et 80 mm par degré, alors qu'un thermomètre à gaz ($p_0 = 1 \text{ m}$) ne donnerait que 4 mm (10). L'instrument réalisé ci-dessus constitue un thermomètre s'adaptant à des mesures de haute précision et susceptible de servir à la graduation de thermomètres à résistance de platine.

17. Thermomètres à tension de vapeur saturante pour températures supérieures à la température ordinaire. — Pour pouvoir utiliser le thermomètre ci-dessus à des températures supérieures à 20°C , divers auteurs ont proposé de porter toute la partie extérieure

1. Les pressions sont limitées à environ 1 m de mercure, facilement mesurable au manomètre à mercure. Exception pour CH^4 . Pour les gaz à haute température voir (14); voir également les publications de l'Institut de physique de Leyde.



TABLE V. — Tensions de vapeur saturante de divers corps en fonction de la température thermodynamique.

CS ₂		SO ₂		NH ₃		CO ₂		HCl		C ₂ H ₄		CH ₄		O ₂	
t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg	t °C	p mm Hg
+ 24	346,6	- 8	829,5	- 36	664,6	- 76	931,5	- 81	805,1	- 106	664,1	- 150	1 718	- 180	1 023
22	321,3	- 10	759,8	- 38	598,9	- 78	792,5	- 80	718,7	- 108	588,0	- 152	1 508	- 181	927
20	297,5	- 12	694,6	- 40	538,7	- 80	672,2	- 88	640,0	- 110	518,4	- 154	1 316	- 182	839
18	275,0	- 14	633,9	- 42	483,5	- 82	568,1	- 90	568,2	- 112	455,0	- 156	1 143	- 183	757,2
16	254,0	- 16	577,7	- 44	433,2	- 84	478,3	- 92	503,1	- 114	397,9	- 158	986	- 184	681,4
14	234,0	- 18	525,3	- 46	387,2	- 86	401,3	- 94	443,9	- 116	346,7	- 160	846,0	- 185	611,6
12	215,4	- 20	470,7	- 48	345,2	- 88	335,6	- 96	390,5	- 118	301,0	- 162	721,1	- 186	547,4
10	198,1	- 22	432,1	- 50	307,1	- 90	279,2	- 98	342,3	- 120	260,3	- 164	608,3	- 187	488,5
8	181,8	- 24	399,9	- 52	272,5	- 92	231,5	- 100	299,1	- 122	224,2	- 166	511,1	- 188	434,6
6	166,7	- 26	352,6	- 54	241,3	- 94	191,2	- 102	260,6	- 124	192,2	- 168	426,2	- 189	385,5
4	152,6	- 28	317,7	- 56	213,0	- 96	157,3	- 104	226,0	- 126	163,9	- 170	352,3	- 190	340,7
2	139,5	- 30	285,8	- 58	187,5	- 98	128,7	- 106	195,5	- 128	138,9	- 172	289,2	- 191	300,2
0	127,3	- 32	256,5	- 60	164,7	- 100	104,8	- 108	168,4	- 130	117,0	- 174	235,5	- 192	263,6



TABLEAU V (suite). — Tensions de vapeur saturante de divers corps en fonction de la température thermodynamique.

	OS ₂		SO ₂		NH ₃		CO ₂		HCl		C ₂ H ₄		CH ₄		O ₂	
	<i>p</i> mm Hg	<i>t</i> °C	<i>p</i> mm Hg	<i>t</i> °C	<i>p</i> mm Hg	<i>t</i> °C	<i>p</i> mm Hg									
— 2	116,0	— 31	229,7	— 02	144,2	— 102	84,0	— 110	144,6	— 132	98,0	— 176	189,4	— 193	230,6	
— 4	105,6	— 36	205,1	— 04	125,9	— 104	88,3	—	—	— 131	81,6	— 178	150,0	— 194	200,9	
— 6	95,9	— 38	182,6	— 06	109,5	—	—	—	—	— 136	67,6	— 180	118,5	— 195	174,4	
— 8	87,0	— 40	162,3	— 08	95,0	—	—	—	—	— 138	55,6	— 182	92,3	— 196	150,9	
—	—	— 42	143,9	— 70	82,2	—	—	—	—	— 140	45,5	— 184	71,0	— 197	129,9	
—	—	— 44	127,3	— 72	70,8	—	—	—	—	— 142	37,0	—	—	— 198	111,3	
—	—	—	—	— 74	60,7	—	—	—	—	— 144	29,8	—	—	— 199	95,0	
—	—	—	—	— 76	52,0	—	—	—	—	— 146	23,9	—	—	— 200	80,7	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 148	19,0	—	—	— 201	68,2	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 150	14,9	—	—	— 202	57,3	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 203	48,0	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 204	39,9	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 205	33,0	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 206	27,1	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 207	22,1	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 208	17,9	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 209	14,4	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 210	11,5	

de l'instrument à une température supérieure à celle de l'enceinte ; cette façon de faire conduit à des solutions d'application pratique difficile sur lesquelles nous n'insisterons pas.

Par contre, pour des mesures dans lesquelles on ne recherche pas une grande précision, on peut utiliser des instruments analogues à celui de la figure 8, mais dans lesquels la partie extérieure à l'enceinte sera *totale*ment remplie de liquide ; le réservoir *a* doit contenir de la vapeur et, condition essentielle, la *surface de séparation du liquide et de sa vapeur doit se trouver à l'intérieur de l'enceinte* dont on mesure la température. Si, pour une raison quelconque (mauvais remplissage, fuites,...), la surface de séparation se trouvait à l'extérieur, on mesurerait en réalité la température à l'endroit de cette surface.

En raison de la présence de liquide entre le réservoir et le dispositif manométrique de mesure, les indications de l'instrument dépendent évidemment de la hauteur verticale de liquide située entre le réservoir et le niveau de mesure *c* ; il en est de même si l'on utilise pour la mesure de la pression un manomètre à déformation élastique.

L'appareil ne sert pratiquement qu'à des mesures industrielles ; en toute rigueur, un instrument n'est exactement gradué que pour une dénivellation déterminée du réservoir par rapport au manomètre ; si cette dénivellation vient à être modifiée, il en résultera des corrections de graduation dont on calculera aisément la valeur ; pour les liquides ordinaires, la correction de pression est voisine de 0,01 kg pour une modification de hauteur de 10 cm ; dans le cas de thermomètres à vapeur de mercure, elle sera 14 fois plus grande.



18. Thermomètres industriels à tension de vapeur.
Liquides de remplissage. — Les thermomètres industriels à tension de vapeur saturante comportent un petit tube réservoir, en acier inoxydable pour les températures élevées, relié au manomètre (type Bourdon) par un tube de faible section. Avec les réserves formulées au paragraphe précédent, l'indication de l'instrument est uniquement fonction de la température du réservoir, les variations thermiques du manomètre et du tube de liaison sont sans influence.

Il importe évidemment pour éviter toute fuite de souder à l'autogène toutes les parties de l'instrument ; les déformations résiduelles du réservoir n'interviennent pas, seules les qualités de fidélité du manomètre et sa sensibilité limitent la précision, sous réserve bien entendu que le liquide de remplissage ne s'altère pas.

Divers liquides peuvent être utilisés ; en fait bien peu sont rigoureusement stables au-dessus de 300°, à l'exception toutefois du mercure qui permet d'atteindre 700° C. Dans le choix du liquide, on est en outre limité par les considérations suivantes : d'une part les températures à mesurer doivent être en pratique comprises entre la température d'ébullition normale et la température critique ; en outre, du fait de la loi de variation de la pression de vapeur avec la température (16), la dérivée dp/dt croît très rapidement avec t , ce qui entraîne une graduation à divisions très serrées aux basses températures et très espacées aux températures élevées. Pratiquement, un même instrument ne peut servir que sur un intervalle de 150 degrés environ.

Nous avons résumé dans le tableau VI les valeurs des tensions de vapeur de quelques liquides utilisés dans la construction des thermomètres à tension de





TABLEAU VI. — Tensions de vapeur saturante, en atmosphères, de quelques liquides, au-dessus de leur température d'ébullition normale.

	alcool méthylique	benzène	eau	toluène	aniline	mercure
80	1,20	0,99				
100	2,25	1,77	1,00	$T_c = 111^\circ \text{C}$		
120	4,25	2,94	1,06	1,3		
140	7,45	4,63	3,57	2,3		
160	12,3	6,95	6,10	3,8		
180	19,3	10,05	9,90	5,7	$T_c = 184^\circ \text{C}$	
200	29,2	14,05	15,35	7,8		
220	42,1	19,1	22,90	10,9		
240	60,0	25,5	33,04	14,4		
260	$T_c = 243^\circ \text{C}$	33,4	46,33	21,1		
280	$P_c = 63 \text{ atm.}$	43,1	63,36	25,1		
300		$T_c = 288^\circ \text{C}$	84,80	32,3		
325		$P_c = 48 \text{ atm.}$	119,0	$T_c = 321^\circ \text{C}$		
350			163,2	$P_c = 42 \text{ atm.}$		$T_c = 350,7^\circ \text{C}$
375			218			2,05
400						4,2
450			Bur. Stand.		$T_c = 426^\circ \text{C}$	
500			J. Research		$P_c = 52 \text{ atm.}$	8,0
550			10, p. 178 (1933)			13,8
600						22,3
650						34
700						50
750						72
800						102

vapeur saturante¹. De tels instruments s'adaptent très bien aux indications à distance et à l'enregistrement des températures ; ils s'adaptent également très bien à la régulation des températures et fournissent une très grande sensibilité².

19. Thermomètre à mercure. Description. — Bien que le thermomètre à mercure ait été abandonné comme instrument international d'interpolation, il n'en reste pas moins un appareil d'usage commode qui conserve sa place dans les laboratoires chaque fois qu'on ne recherche pas une très haute précision.

Il est constitué, comme tous les thermomètres à dilatation de liquide, par un réservoir, de plus ou moins grand volume suivant la sensibilité cherchée, auquel on soude une tige capillaire servant aux lectures des dilatations. Sur cette tige est tracée une graduation en parties d'égale longueur, représentant des degrés ou fractions déterminées de degré ($1/5$ ou $1/10$).

Une petite difficulté se présente pour éviter, dans les lectures, l'erreur de parallaxe (fig. 9) ; l'observation du niveau du mercure doit être effectuée normalement à la tige. Pour éviter cette erreur, on a proposé³ le tracé d'une double graduation, disposée de part et d'autre de la tige ; pour la lecture, l'œil doit être disposé de façon à voir les deux traits avant de l'une des échelles se projeter sur les deux traits correspondants de l'échelle arrière.

Nous dirons un mot plus loin des thermomètres à mercure destinés à des buts spéciaux ; nous nous contenterons de donner ici quelques indications sur



¹ Au-dessous de la pression atmosphérique. Voir le Recueil des constantes de la Société française de physique. p. 294.
² R. Ac. Sc., 193, p. 1402 (1931).
³ c. Sc., 196, p. 1090 (1933).

les thermomètres destinés aux températures élevées. Pour permettre le contrôle des points 0 et 100°, on réserve (fig. 9 bis), le long de la colonne de mercure, de petits réservoirs auxiliaires permettant de rassembler, sous une faible longueur, la portion de l'échelle (0-100°, 100-300°) sur laquelle ne doivent pas porter les mesures.

Pour les températures relativement faibles (jusqu'à 150 ou 200° C), la tige capillaire, au-dessus du mercure, est privée d'air par une ébullition préalable du mercure. Au-dessus de 150°C, la vaporisation du mercure peut en.

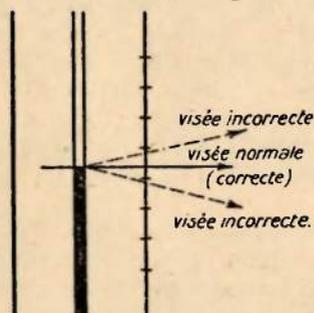


FIG. 9.

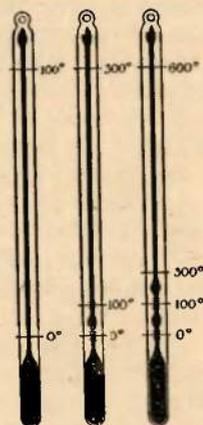


FIG. 9 bis.

traîner la condensation de gouttelettes vers la partie supérieure de la tige ; elle peut même entraîner une coupure de la colonne de mercure. Il en résulterait une erreur que l'on évite en disposant, au-dessus du mercure, un gaz neutre dont la pression peut atteindre 50 atmosphères (tableau VI) ; il est alors indispensable de prévoir, à la partie supérieure de la tige un réservoir assez grand pour que la pression intérieure du gaz ne dépende pas trop de la position du mercure dans la tige capillaire.



ULTIMHEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

20. Nature de l'enveloppe du thermomètre. — L'enveloppe du thermomètre doit être choisie de façon à supporter, sans se ramollir, les températures auxquelles on destine l'appareil ; ces températures de ramollissement sont respectivement voisines de 500°C pour les verres Iéna 16^{III} et 59^{III}, 660°C pour le verre Iéna 1565^{III} et 500°C pour le verre Ilmenau.

Des tentatives ont été faites pour utiliser le quartz fondu transparent comme enveloppe ; il permet de dépasser 750°C ; malheureusement sa graduation est loin de garder la stabilité des thermomètres à enveloppe de verre, et on doit, pour l'instant, renoncer à l'utiliser pour des mesures quelque peu précises.

L'enveloppe d'un thermomètre en verre, après soufflage du réservoir, doit subir un recuit convenable et prolongé¹, pour éviter les défauts inhérents à la trempe du verre ; pour éviter également dans la suite une évolution lente, il est préférable de n'effectuer le remplissage ou l'emploi qu'un temps assez long après la construction (plusieurs années dans les thermomètres de précision).

21. Corrections à faire subir au thermomètre à mercure pour ramener ses indications à l'échelle thermodynamique. — Dans un thermomètre à mercure, le phénomène thermométrique utilisé est la dilatation apparente du mercure dans son enveloppe de verre, c'est-à-dire la dilatation vraie du mercure (donnée par une formule parabolique) de laquelle il faut retrancher la dilatation de l'enveloppe². Cette dernière dilatation variant d'un type de verre à l'autre, il faut s'attendre

1. Un thermomètre mal recuit peut évoluer de plusieurs dizaines de degrés, surtout s'il doit servir à des températures élevées.

2. Pour la dilatation vraie du mercure, voir *Recueil de constantes de la Société française de physique*, p. 140 ; pour celle des verres : approchés le coefficient de dilatation apparente peut être pris égal à $1/6000$.

à ce que les divers thermomètres à mercure ne donnent pas des indications comparables.

En outre, l'échelle que définirait la dilatation vraie du mercure ne coïncide pas avec l'échelle thermodynamique ; on doit donc trouver des écarts entre la graduation d'un thermomètre à mercure et l'échelle thermodynamique. Ces écarts sont donnés par le tableau VII pour différents verres spécialement étudiés en vue de la construction des thermomètres¹.

TABLEAU VII. — Tableau de correspondance entre la température thermodynamique t et la température du thermomètre à mercure.

t (°C)	Iéna 16 ¹¹¹	Iéna 59 ¹¹¹	Iéna 1565 ¹¹¹	Hmenau
— 30	— 30,28	— 30,13		
0	0,00	0,00	0,00	0,00
+ 50	+ 50,12	+ 50,03	+ 50,05	+ 50,11
100	100,00	100,00	100,00	100,00
150	149,99	150,23	150,04	149,9
200	200,29	200,84	200,90	200,3
250	251,1	252,2	252,1	250,9
300	302,7	304,4	303,9	302,4
350		358,0	356,6	354,9
400		412,6	410,5	408,2
450		468,8	465,9	463,7
500		526,9	523,1	
600			614	

On remarquera que, même entre les deux points fixes 0 et 100°, les écarts entre les deux échelles ne sont pas négligeables ; ils deviennent très importants au delà de 300° C.



22. Dépression du zéro. Manière de conduire les mesures. — Un thermomètre à mercure subit des

SHEEL et HENNING, *Warmtabelle*n, Braunschweig

résidus de dilatation qui entraînent un déplacement du zéro. Pour évaluer la qualité d'un verre à ce point de vue, la technique consiste : 1° à disposer le thermomètre pendant très longtemps (quelques semaines) dans la glace fondante et à noter la division d'affleurement du mercure ; 2° à porter ensuite l'instrument à 100° pendant quelques minutes ou quelques heures suivant les verres ; 3° à reporter le thermomètre dans la glace fondante. La dépression de l'instrument est fournie par l'excès de la première lecture sur la troisième. Pour les quatre verres indiqués au tableau VII, cette dépression a les valeurs suivantes : 0,04, 0,03, 0,01 et 0,04°. Un verre de mauvaise qualité peut donner des dépressions qui atteignent 0,15°.

Pour obvier à ce défaut, la conduite d'une mesure, effectuée *au-dessus de 0°*, est la suivante. On porte d'abord le thermomètre dans l'enceinte à température élevée ; on note la division d'affleurement (par exemple : + 80°,17), puis on porte aussitôt après le thermomètre dans la glace fondante et on note la division d'affleurement (par ex. : — 0°,08) ; la température à mesurer s'obtient en retranchant la seconde lecture de la première, ici 80°,25.

Bien entendu, la graduation de l'instrument devra s'effectuer de façon analogue, c'est-à-dire que le point 100° devra être repéré *avant* le point 0°.

23. Correction de colonne émergente. — Une grave cause d'erreur se présente lorsque toute la tige du thermomètre ne se trouve pas plongée, jusqu'à la partie supérieure de la colonne mercurielle, dans l'enceinte dont on veut déterminer la température.

Soit t_1 la division du thermomètre correspondant à la partie de la tige qui n'est pas plongée dans l'enceinte (fig. 10 a), lue sur la tige. Si nous plongeons le thermomètre dans l'enceinte à la température t_2 , lue sur la tige. Si nous plongeons le thermomètre dans l'enceinte à la température t_3 , lue sur la tige. Si nous plongeons le thermomètre dans l'enceinte à la température t_4 , lue sur la tige.



toute la tige dans l'enceinte (fig. b), la colonne de mercure comprise entre t et t_1 va se trouver portée de la température de l'air extérieur θ à la température t de l'enceinte ; il va en résulter un allongement de la colonne mercurielle, dû à sa dilatation apparente entre les températures θ et t ; la division atteinte par le mercure sera t' , supérieure à t .

La correction $t' - t$ correspond donc à la variation de volume apparent d'une colonne, de longueur $t - t_1$, portée de θ à t ; elle est fournie immédiatement par la formule :

$$t' - t = a (t - t_1) (t - \theta).$$

Le coefficient a à adopter dans cette formule est le coefficient de dilatation cubique apparente du mercure dans le verre, égal à 0,00016 ¹.

Dans le calcul qui précède, nous avons admis que, dans le premier cas, la colonne extérieure était, *tout entière*, à la température de l'air extérieur

(fournie par un thermomètre auxiliaire) ; en pratique, il n'en est pas exactement ainsi. Par suite de la conductibilité du mercure, de celle du verre, en outre à cause des courants de convection, une partie de la tige extérieure du thermomètre est à une température supérieure à la température ambiante θ .

Il semble bien difficile de faire une évaluation même grossière de la répartition des températures dans la tige extérieure ; la seule conclusion sûre que l'on

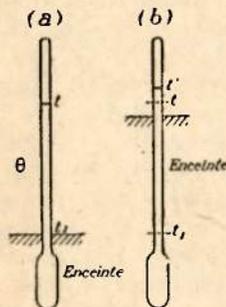


Fig. 10.



¹ La dilatabilité du mercure dans le verre est la même que celle du mercure dans le verre. La valeur de ce coefficient, d'un verre à l'autre, est donnée dans le tableau ci-dessous. Elle donne l'incertitude dans le calcul de la correction.

puisse tirer est que la correction calculée plus haut est *trop forte*.

Précisons l'ordre de grandeur de cette correction. Supposons le cas d'un thermomètre plongé dans l'étuve à point 100° jusqu'à la division $t_1 = + 20^{\circ}$; la température extérieure est $\theta = 20^{\circ}$. La formule donnée plus haut fournit :

$$\Delta t = 1,6.10^{-4} \times 80 \times 80 = 1^{\circ}0.$$

Pour évaluer cette correction avec plus de sécurité, au lieu de noter θ avec un thermomètre éloigné de l'étuve, il y a avantage à le placer près de la colonne émergente, par exemple au quart de la hauteur à partir de l'étuve; on aura un meilleur résultat en évaluant la température moyenne de la colonne émergente, ou au moyen d'un thermomètre spécial dont le réservoir occupera toute la hauteur de la colonne émergente, ou mieux avec un thermomètre à résistance enroulé régulièrement sur toute la hauteur de cette colonne.

TABLEAU VIII. — Corrections de colonne émergente pour deux thermomètres gradués de 0 à 150° et de 200 à 300° C (longueur totale de la tige : 12 cm environ).

Température lue	Nombre de degrés extérieurs	Temp. moyenne de la colonne émergente	Correction observée Δ_o	Correction Δ_c calculée avec $\theta = 20^{\circ}$	$\frac{\Delta_o}{\Delta_c}$
50	30	35	0,07	0,14	0,5
100	80	45	0,7	1,0	0,7
150	130	55	2,0	2,7	0,7
200		75	0,2	0,3	0,7
250		85	1,6	2,2	0,7
300		100	3,5	4,9	0,7



Nous empruntons à une publication du Bureau of Standards ¹ les nombres suivants (Tableau VIII) fournis par l'expérience pour deux thermomètres (longueur 12 cm environ) gradués l'un de 0 à 150° C, l'autre de 200 à 300° C ; les divisions d'émergence sont respectivement 20 et 190°.

Les chiffres de la dernière colonne montrent que l'on a une assez bonne valeur de la correction de colonne émergente en admettant une valeur égale aux $7/10$ de la correction calculée.

Remarquons toutefois que les thermomètres ci-dessus ont une tige relativement courte ; pour des thermomètres de précision dont la tige peut atteindre 40 cm, le coefficient à adopter serait plus élevé. Pour un thermomètre analogue à ceux de droite de la figure 9, la correction serait relativement plus faible et d'ailleurs fort incertaine si le réservoir auxiliaire n'est pas plongé dans l'enceinte.

Les considérations précédentes montrent la difficulté d'effectuer avec quelque précision la correction de colonne émergente, aussi convient-il de l'éliminer chaque fois qu'on le pourra ; dans le cas contraire, le mieux sera de graduer l'instrument dans les conditions de son emploi, en ayant soin de dessiner un repère à l'endroit de la colonne émergeant hors de l'enceinte.

24. Corrections de pression intérieure et extérieure.

— Les thermomètres de précision sont en général gradués en position horizontale ² ; si on les place en position verticale, le réservoir se trouve soumis à une pression (*pression intérieure*) égale au poids de la colonne de mercure qui surmonte le réservoir. Il en résulte une dilatation du réservoir et par suite un *abaissement*:



¹ Paper, n° 49.
² Consulter au constructeur.

du niveau du mercure dans la tige capillaire, sa valeur est d'environ 10^{-4} degré par millimètre de hauteur du mercure au-dessus du réservoir. Un thermomètre gradué dans l'étuve à point 100° (25) en position horizontale et dont la tige a 40 cm de longueur fournira, en position verticale, une température inférieure à la précédente de 0,04 degré. On le voit, une telle correction n'intervient que dans les thermomètres de précision.

Pour des raisons analogues, un thermomètre plongé dans une enceinte où règne une forte pression devra subir une correction de *pression extérieure* qui tient à la compression du réservoir, entraînant une *élévation* du niveau du mercure dans la tige. La correction est du même ordre que dans le cas de la pression intérieure, c'est-à-dire d'environ 10^{-4} degré par millimètre de mercure ; elle est tout à fait négligeable dans le cas des bains liquides ordinaires au sein desquels se trouve plongé le réservoir.

25. Graduation d'un thermomètre à mercure. — Comme nous l'avons vu (22), le repérage des points fixes sur la tige doit se faire d'abord pour le point 100° . On utilisera à cet effet l'ancienne étuve de Gay-Lussac donnée par la figure 11.

Pour des déterminations de précision, permettant en particulier l'étalonnage de l'instrument en position horizontale et en position verticale, on utilisera l'étuve employée par P. Chappuis au Bureau international des poids et mesures (fig. 12). La vapeur est fournie par la chaudière C ; elle est introduite et évacuée par deux tubes T_1 T_2 susceptibles de tourner dans deux colliers ; un réfrigérant à circulation d'eau permet de ramener l'eau dans la chaudière.

On note, avec soin la pression barométrique du



ménisque convexe ; les thermomètres remplis d'autres liquides mouillant le verre ne pourront prétendre à la même précision. Le mercure a en outre l'avantage appréciable de pouvoir servir aux températures élevées, sans que sa tension de vapeur devienne excessive ; l'examen du tableau VI montre que l'aniline, qui a une température critique égale à 426° C, ne peut pas être utilisée au delà de 400° C, encore faut-il surmonter le liquide d'un gaz inerte sous une pression de l'ordre de 50 atmosphères.

Pour les températures très élevées, on a proposé assez récemment l'emploi d'un thermomètre à enveloppe de quartz contenant du gallium comme liquide thermométrique¹ ; ce corps qui fond à 30° environ ne se vaporise qu'à $1\ 700^{\circ}$ C sous la pression atmosphérique, et peut dès lors servir jusqu'à $1\ 000^{\circ}$ C sans que l'on ait à ajouter un gaz sous pression dans la colonne de l'instrument.

Aux très basses températures, le mercure ne peut pas servir, son point de solidification se trouve en effet voisin de -39° . Jusqu'à -80° , on utilise l'alcool et le toluène ; jusqu'à -200° , il convient d'adopter le pentane.

Pour graduer de tels instruments, la seule solution qui se montre sûre consiste à les comparer au thermomètre à résistance de platine².

Les thermomètres à liquides peuvent être aisément adaptés à la régulation de thermostats ; on trouvera ailleurs la disposition adoptée dans la réalisation d'un cryostat avec régulateur au pentane (13).



28. Thermomètres industriels à dilatation de liquide.

1. S. Deshpande, J. Franklin Institute, 201, p. 69 (1926).

2. On trouvera dans le Recueil de constantes de la Société française de physique (p. 15) les ordres de grandeur des corrections.

— Dans la construction de thermomètres destinés à fournir la température ambiante, on utilise un liquide remplissant totalement un tube manométrique ; sous l'action de la différence de dilatation entre le liquide et son enveloppe, le tube manométrique se déforme ; ses déformations sont amplifiées au moyen d'une aiguille indicatrice ou inscriptrice.

L'instrument peut s'adapter aux indications et à l'enregistrement à distance ; le réservoir, placé dans l'enceinte, est relié au manomètre extérieur de mesure par un tube capillaire, l'ensemble étant parfaitement rempli de liquide. Sans précautions spéciales, un tel instrument serait très imparfait, surtout aux grandes distances, en raison des dilatations parasites du liquide contenu dans le tube de jonction et le manomètre, sous l'influence des variations de la température extérieure. Pour supprimer cette cause d'erreur, on adopte un montage différentiel comportant un second tube manométrique identique au premier et un tube capillaire accolé au tube de jonction sur toute sa longueur jusqu'à l'entrée de l'enceinte ; les deux tubes sont remplis du même liquide que le dispositif de mesure. Le second tube manométrique est monté de façon que le déplacement qu'il imprime au système mobile se retranche de celui imposé par le tube manométrique principal¹.

Le mercure, enfermé dans une enveloppe d'acier, permet d'atteindre 600° C. Un tel thermomètre présente sur le thermomètre à tension de vapeur (18) l'avantage d'une échelle régulière à divisions sensiblement égales. avantage précieux pour un appareil à lecture directe et surtout pour l'enregistrement. Dans ce thermomètre il est indispensable que toutes les

1. Voir les notices des constructeurs : J. RICHARD, FOURNIER...



ULT:MEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

jonctions soient effectuées par soudure autogène ; un tel instrument ne peut prétendre à une extrême précision en raison des déformations permanentes et résiduelles que peut prendre le métal du réservoir, ou du tube de jonction, également en raison d'un léger manque de fidélité du manomètre de mesures ; il importe d'effectuer un contrôle fréquent de son étalonnage.

29. Thermomètres à liquides pour buts spéciaux. —

Pour des buts cryoscopiques ou ébullioscopiques, dans lesquels on se préoccupe de mesurer une différence de deux températures, on adopte une variante du thermomètre à mercure (thermomètre Beckmann) (fig. 13 a) dans laquelle on peut faire échapper du réservoir une faible quantité de mercure, de façon à effectuer indifféremment des mesures, sur la tige capillaire (correspondant à 6 degrés seulement), au voisinage de températures t qui peuvent varier de -20° à $+120^{\circ}$ par exemple. Il convient de faire remarquer que le volume de mercure sur lequel porte

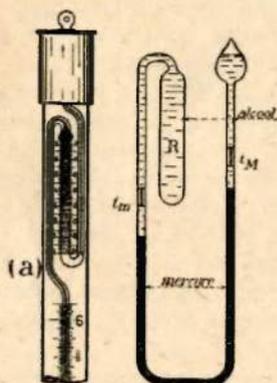


FIG. 13.

la dilatation change avec t ; la différence relative de volume correspondant aux températures extrêmes au-dessus est d'environ 2,3 % (21) ; la mesure d'un écart en températures, égal à 4° sur l'échelle, peut de ce fait comporter une correction de $0^{\circ},09$. Pour un thermomètre appelé à servir dans un intervalle

la dilatation change avec t ; la différence relative de volume correspondant aux températures extrêmes au-dessus est d'environ 2,3 % (21) ; la mesure d'un écart en températures, égal à 4° sur l'échelle, peut de ce fait comporter une correction de $0^{\circ},09$. Pour un thermomètre appelé à servir dans un intervalle



de températures plus restreint, la correction serait évidemment moins élevée.

La figure 13 donne également la disposition adoptée dans le thermomètre classique à maximum et minimum ; deux petits index i_m et i_M , plongés dans l'alcool, et poussés par la colonne de mercure dans son déplacement, indiquent respectivement les températures minimum et maximum atteintes. Ces index, dans lesquels on incorpore un bout de fil de fer, peuvent être ramenés au contact du mercure au moyen d'un petit aimant.



CHAPITRE IV

THERMOMÈTRE A RÉSISTANCE DE PLATINE. — THERMOMÈTRES A RÉSISTANCE MÉTALLI- QUE.

30. Thermomètre à résistance de platine. — Dès 1886, Callendar a montré que la résistance du platine pouvait se représenter par une formule parabolique en fonction de la température t fournie par le thermomètre à gaz. Nous avons vu plus haut que la 7^e Conférence internationale des poids et mesures a adopté le thermomètre à résistance de platine comme instrument d'interpolation entre les trois points fixes admis dans la même convention. Ce thermomètre, qui peut servir jusqu'à 660° pour des mesures de haute précision, présente en outre l'avantage de pouvoir être utilisé jusqu'aux très basses températures.

Comme dans les chapitres suivants, nous décrirons d'abord l'appareil de précision avec quelques détails sur la technique de mesure. Nous donnerons ensuite quelques indications sur les thermomètres à résistance d'usage courant, avec leur adaptation aux divers problèmes de la pratique.



reté du platine. — Pour que le platine uti-
lisé dans une échelle de températures correcte, il

importe que sa pureté soit suffisante, aussi croyons-nous devoir donner quelques indications générales sur les divers critères que l'on possède pour se faire une idée de la pureté d'un échantillon de platine.

L'*analyse chimique* rencontre quelques difficultés si l'on ne dispose que de faibles quantités d'échantillon et lorsqu'il s'agit de métal relativement pur. L'*analyse spectroscopique* permet de préciser les impuretés (le plus fréquemment calcium et fer), sans toutefois fixer leur importance.

Deux critères physiques peuvent être retenus pour se faire une idée de l'état de pureté d'un échantillon de platine. Le premier consiste à étudier la *variation de la résistance électrique* de l'échantillon entre 0 et 100°. Le métal le plus pur obtenu jusqu'ici au Bureau of Standards possède un rapport $R_{100}/R_0 = 1,3925$ (R_{100} et R_0 , résistances à 100° et 0°); pour la fixation de l'échelle internationale¹, la pureté du métal doit être telle que ce rapport soit au moins égal à 1,391; cela entraîne, pour le point d'ébullition du soufre, un rapport R/R_0 supérieur à 2,647 et, pour le point d'ébullition de l'oxygène, inférieur à 0,250.

Une deuxième méthode physique consiste à mesurer la *force électromotrice thermoélectrique* entre l'échantillon à étudier et un échantillon très pur, dont la pureté est supposée connue. Les deux fils utilisés sont soudés de façon à donner un couple dont la force thermoélectrique sera mesurée à une température *approximativement* connue: 1 000 ou 1 200° C. Entre deux échantillons pour lesquels le rapport R_{100}/R_0 est respectivement égal à 1,3925 et 1,390, la force électromotrice à 1 200° est de 70 μ V environ².



¹ Adoptée en 1939.
² Ce n'est que par un accord international que l'on a pu convenir de la pureté la plus constante; il s'agit ici d'échantillons contenant les impuretés les plus communes (fer, calcium).

TABLEAU IX. — Résultats de divers essais de détermination de la pureté d'échantillons de platine.

Critérium de pureté	Platine étalon (Bureau of Standards)	Échantil- lon I	Échantil- lon II
Analyse chimique	aucune impureté décelable	0,99998 ₅	0,99997 ₅
Analyse spectrogra- phique	—	Très faibles traces de Fe, Ca.	Fe, très fai- ble ; Ca, faible ; Al, trace.
R_{100}/R_0	1,3925	1,3916	1,3904
F.e.m. en μV par rapport au Pt éta- lon (à 1200° C)	0	40	70

La méthode ainsi définie est extrêmement sensible, la mesure de cette f.e.m. pouvant s'effectuer avec précision au moyen d'un simple galvanomètre branché directement aux bornes du couple. Le tableau IX fournit quelques données sur divers échantillons de platine pur étudiés par ces diverses méthodes.

31. Loi de variation de la résistance électrique du platine avec la température. — On peut, comme l'a fait Callendar, définir un coefficient α analogue au coefficient de dilatation des gaz et donné par :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}.$$

Si la loi de variation de résistance du platine était linéaire, la variation de résistance du platine avec la température serait définie par :



$$t_p = 100. \frac{R - R_0}{R_{100} - R_0} = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} \left[t_p, \text{température « platine »} \right].$$

Du fait que cette loi de variation n'est pas linéaire, il convient d'ajouter un terme correctif que Callendar a mis sous la forme :

$$\delta \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right),$$

ce qui conduit à la formule complète :

$$R_t = R_0 \left[1 + \alpha \left(t + \frac{\delta}{100} \right) t - \frac{\alpha \delta}{(100)^2} t^2 \right].$$

Si l'on rapproche cette formule précédente de la formule $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$ admise dans la convention internationale, il en résulte, entre les divers coefficients, les relations suivantes :

$$A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right), \quad B = - \frac{\alpha \delta}{(100)^2}.$$

Pour le platine, dont la pureté limite a été fixée par la Convention internationale, on a $\alpha = 0,00390$ et δ très voisin de 1,50 (1,496) ; cela conduit à des valeurs des constantes A et B respectivement voisines de $3,96 \cdot 10^{-3}$ et $-6 \cdot 10^{-7}$. La variation relative de résistance, pour un accroissement de température de 1°, est fournie par la relation :

$$\frac{dR}{dt} = 3,96 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-6} t;$$

elle varie linéairement en fonction de t , du moins dans les limites où la loi parabolique reste valable. Nous donnons (Tableau X) la résistance d'un tel échantillon de platine entre 0 et 700° C. On trouvera plus loin (45) les valeurs de cette résistance au-dessous de 0°, on y remarquera que dR/dt croît très régulièrement au fur et à mesure que la température s'abaisse ; toutefois, cette croiss.

cesse d'être régulière à partir de



—180° C, cela conduit à introduire (6) un terme correctif obtenu au moyen d'un étalonnage à la température d'ébullition de l'oxygène.

32. Réalisation d'un thermomètre à résistance de platine. — La convention internationale précise que le

diamètre du fil utilisé pour le bobinage du thermomètre doit être compris entre 0,05 et 0,20 mm. Il convient, en effet, de ne pas descendre au-dessous de la première de ces valeurs, si l'on ne veut pas voir le fil s'altérer assez rapidement et sa résistance se modifier; ne pas adopter non plus un fil de diamètre trop élevé, sa faible résistance se mesurant avec moins de précision. A titre d'indication, un fil de 0,10 mm de diamètre et de 1 m de longueur a une résistance d'environ 15 ohms à 0°.

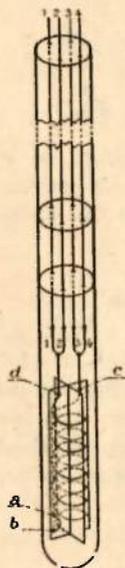


FIG. 14.

Avant de bobiner le fil sur le thermomètre, on le recuirea électriquement, pendant une demi-heure au moins à des températures de 800 à 1 000°. Le bobinage du fil est ensuite effectué sur un croisillon en mica ou en porcelaine¹, dont la hauteur courante est d'environ 5 cm. Pour accroître la longueur du fil et, par suite, la résistance du thermomètre, on peut enrouler préalablement le fil sous forme d'hélice de diamètre faible (1 à 2 mm), le boudin ainsi constitué est alors enroulé lui-même sur le croisillon précédent.



¹ La façon la plus courante d'effectuer ce bobinage consiste à plier le fil en deux et à accrocher la boucle en U médiane dans deux encoches et à enrouler les deux extrémités à la base du croisillon (fig. 14). Les deux extrémités présentent deux trous c et d percés à la partie supérieure du

TABLEAU X. — Échelle de température du thermomètre à résistance de platine.

$$R/R_0 = 1,370 \text{ et } 2,645 \text{ à } 100^\circ \text{ et } 440^\circ,60.$$

$$R = R_0 (1 + 3,95805 \cdot 10^{-3} t - 5,805 \cdot 10^{-4} t^2).$$

<i>t</i> ^o C	R/R ₀						
0	1,00000						
10	1,03900	210	1,80560	410	2,52528	610	3,19856
20	1,07893	220	1,84269	420	2,56005	620	3,23101
30	1,11822	230	1,87966	430	2,59470	630	3,26334
40	1,15739	240	1,91651	440	2,62923	640	3,29555
50	1,19645	250	1,95332	450	2,66347	650	3,32747
60	1,23539	260	1,98987	460	2,69795	660	3,35963
70	1,27422	270	2,02638	470	2,73214	670	3,39150
80	1,31293	280	2,06277	480	2,76621	680	3,42325
90	1,35152	290	2,09904	490	2,80016	690	3,45488
100	1,39000	300	2,13517	500	2,83390	700	3,48619
110	1,42836	310	2,17124	510	2,86772	750	3,64200
120	1,46661	320	2,20717	520	2,90133	800	3,79192
130	1,50474	330	2,24298	530	2,93412		
140	1,54275	340	2,27867	540	2,96819		
150	1,58045	350	2,31530	550	3,00132		
160	1,61843	360	2,34971	560	3,03459		
170	1,65610	370	2,38506	570	3,06762		
180	1,69465	380	2,42029	580	3,10053		
190	1,73108	390	2,45540	590	3,13332		
200	1,76839	400	2,49034	600	3,16585		

Aux extrémités du fil de mesure, on soudera deux fils de platine en forme d'U, lesquels seront reliés directement aux quatre bornes placées sur la monture extérieure du thermomètre. On peut également assurer la liaison des quatre extrémités de ces deux U aux quatre bornes, au moyen de fils d'or ou d'argent. L'ensemble est fixé dans une monture rigide à l'intérieur d'un tube de protection en quartz fondu (ou en porcelaine). L'isolement des quatre fils de jonction est assuré au moyen de petits disques de mica,



© 1998 G. Ruxton Mesure des températures.

Il est avantageux, en particulier aux basses températures, de remplir le tube de protection d'hélium¹ sous une pression d'environ $2/3$ d'atmosphère et de sceller ensuite hermétiquement l'extrémité au moyen de cire peu fusible. La présence de l'hélium a l'avantage de réduire l'inertie thermométrique de l'instrument et, surtout aux basses températures, d'éviter la condensation de la vapeur d'eau ou des gaz (oxygène, azote), qui pourrait provoquer des contacts entre les spires de l'enroulement.

Les dimensions les plus couramment adoptées pour un tel instrument sont les suivantes : diamètre du croisillon : 5 mm, hauteur : 5 cm, longueur du tube de protection : 40 à 50 cm.

Bien entendu, ces dimensions n'ont rien d'absolu ; pour certaines mesures dans un espace limité on peut réaliser un thermomètre boudiné de dimensions nettement plus faibles.

Les quatre bornes sur lesquelles se font les connections extérieures doivent être prises de préférence en cuivre, et non en laiton, de façon à éviter le plus possible les forces thermo-électriques parasites entre ces bornes et les fils extérieurs de jonction.

Lorsque la construction du thermomètre est terminée, pour supprimer les tensions qui ont pu se produire dans les fils au cours du bobinage, il importe d'effectuer plusieurs recuits à une température supérieure à la température d'utilisation (700°) jusqu'à ce que la résistance du thermomètre à 0° conserve une valeur bien constante.



e de la résistance. Méthode potentiométrique. — Pour des mesures de précision, on peut

ne, bien que très conducteur de la chaleur, conviendrait e ses propriétés réductrices aux températures élevées.

adopter la méthode potentiométrique, qui consiste à faire circuler un même courant dans le thermomètre, de résistance X , et dans une résistance étalon R . On mesure au potentiomètre les différences de potentiel aux bornes de chacune des résistances X et R ; leur rapport sera égal à X/R .

En pratique, le courant circulant dans le thermomètre, compris entre 1/100 et 1/1 000 d'ampère, sera introduit par les fils 1 et 4 par exemple (fig. 14) et la différence de potentiel sera prise au moyen des fils 2

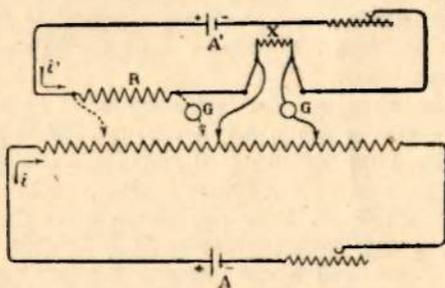


FIG. 15.

et 3. La figure 15 donne le montage d'ensemble d'une telle mesure; un commutateur permet de brancher sur le potentiomètre et sur G , soit la résistance X , soit la résistance étalon R .

Il peut arriver que le courant de mesure i' produise, dans le fil du thermomètre, un échauffement non négligeable; pour faire la correction, on peut opérer de la façon suivante: on effectue une première mesure de X avec un courant i' , soit R_1 ; puis une deuxième mesure avec un courant $2i'$, soit R_2 . Si X est la résistance du thermomètre pour un courant nul, pour le courant i' sa résistance est $X + \varepsilon$ et, comme l'échauf-

fement est proportionnel au carré du courant, pour 2i' la résistance sera égale à $X + 4\varepsilon$. Des deux formules précédentes on tire immédiatement

$$X = \frac{4R_1 - R_2}{3}.$$

34. Précision dans la mesure au potentiomètre. — La résistance d'un thermomètre, construit comme nous l'avons indiqué plus haut, est comprise entre 10 et 50 ohms à 0°, suivant le diamètre et la longueur adoptés; elle conduit, à 660°, à des résistances d'environ 40 et 200 ohms. Pour des courants de 0,001 à 0,01 A, les f.e.m. à mesurer sont comprises entre 10mV et 2 volts.

Comme la résistance au voisinage de 0° varie d'environ 4/100Q par degré, si l'on veut mesurer la température au 1/100 de degré, il importe d'effectuer la mesure de la résistance avec une erreur relative inférieure à 4/100 000. Pour un thermomètre de résistance $X = 10 \Omega$ et un courant de 0,001 A, cette erreur relative correspond à une erreur inférieure à 0,4 V, délicate à éliminer, en raison des forces thermo-électriques parasites susceptibles de se produire dans les circuits de mesure.

Cette indication montre l'intérêt qu'il y a à adopter des thermomètres de résistance relativement élevée et des courants de mesure suffisamment grands pour que les f.e.m. à mesurer soient de l'ordre de 100mV. Avec quelques précautions, l'emploi d'un très bon potentiomètre permet d'atteindre aisément le centième de degré. Nous donnerons plus loin quelques indications sur ces potentiomètres (50).



35. Pont de Wheatstone équilibré. — La figure 16 rappelle le schéma général d'un pont de Wheatstone;

lorsque le galvanomètre G n'est parcouru par aucun courant, l'intensité i est la même dans les résistances R_1 et R_3 ; elle est également la même (i') dans les résistances R_2 et X, et l'on a immédiatement :

$$i R_1 = i' R_2 \text{ et } i R_3 = i' X \text{ d'où } \frac{X}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}.$$

En général, on s'arrange pour que les deux résistances R_1 et R_2 soient égales, dès lors $X = R_3$.

La mesure de la résistance X d'un thermomètre à résistance de platine se trouve toutefois compliquée, du fait de la nécessité d'éliminer la résistance des fils de jonction, toujours mal définie et susceptible de varier avec la profondeur d'immersion du thermomètre dans l'enceinte.

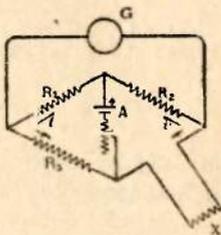


FIG. 16.

Pour des mesures de haute précision, on utilise la méthode des 4 fils, donnée par la figure 17. L'accumulateur A est relié d'abord à la borne c, les deux branches du pont étant connectées sur les bornes C et D. Lorsque l'équilibre est réalisé, on a $R_3 + Ce = X + Df$. On relie ensuite l'accumulateur à d et on intervertit les bornes C et D sur le pont. On a alors, lorsque le pont est équilibré : $R_3 + Df = X + Ce$, d'où l'on déduit immédiatement $X = \frac{R_3 + R'_3}{2}$; les

mesures ainsi effectuées éliminent totalement les résistances des fils de jonction.

Il n'est pas inutile de préciser le fractionnement que l'on doit réaliser sur la résistance R_3 pour que les mesures de la température puissent être faites avec la précision de 0,01, de 0,001 par exemple. Pour une



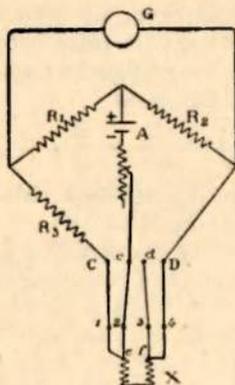


FIG. 17.

résistance de thermomètre de 10Ω (à 0°), $0,001$ correspond à une variation de résistance de $0,0004 \Omega$, cela suppose une boîte de résistance fractionnée en $0,0001 \Omega$. Une résistance $X_0 = 50 \Omega$ nécessite une résistance fractionnée en millièmes d'ohm seulement.

36. Méthode des trois fils. —

Lorsqu'on ne recherche pas une très haute précision, on peut utiliser la méthode du pont avec thermomètre à 3 fils (fig. 18). Les deux fils de jonction Ce et Df sont réalisés aussi identiques que possible.

Lorsque l'équilibre du pont est obtenu, on a, (toujours si $R_1 = R_2$): $X + Df = R_3 + Ce$, d'où $X = R_3$ puisque nous avons supposé Ce et Df égaux. Une mesure effectuée sous cette forme nécessite un thermomètre muni de trois bornes seulement.

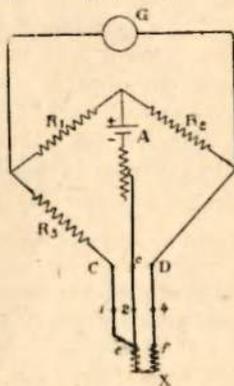


FIG. 18.

37. Graduation du thermomètre à résistance de platine entre 0 et 660° . — Pour toute la zone de températures qui s'étend de 0 à 660° , la graduation de l'instrument est faite au moyen des trois points fixes : 0° , 360° et $444^\circ,60$. En ce qui concerne les points 0 et



100°, nous renverrons aux indications données à propos du thermomètre à mercure (25). Nous allons rappeler ici les spécifications internationales relatives à la température d'ébullition du soufre. La figure 19 donne un dessin du thermostat utilisé pour cette graduation. Il y a avantage à utiliser un chauffage électrique ; le soufre est disposé dans un tube T en verre pyrex de 4 à 6 cm de diamètre, plongé dans le four comportant, sur 20 cm environ, un enroulement de nichrome. Le tube sur lequel est fait l'enroulement est prolongé, vers le haut, sur une longueur d'au moins 25 cm et calorifugé sur toute sa hauteur, au moyen de terre d'infusoires *i* d'épaisseur suffisante (10 cm). Le soufre liquide dans le tube de pyrex doit s'élever à 4 cm au moins au-dessus de la partie supérieure de l'enroulement chauffant.

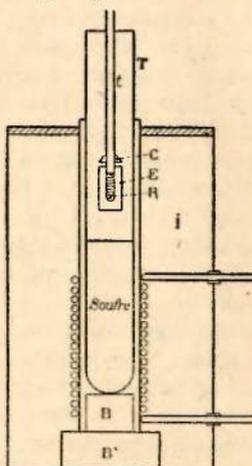


FIG. 19.

Le réservoir R est descendu à une hauteur d'au moins 8 cm au-dessus du niveau du soufre. Pour éviter le rayonnement des parties chaudes du four vers le thermomètre, on dispose, autour de celui-ci, un écran cylindrique protecteur E en tôle ou en graphite, dont le diamètre est supérieur d'au moins 1,5 cm au diamètre du tube de protection du thermomètre. De même, l'espace compris entre cet écran et le tube de pyrex doit être d'au moins 1 cm. Ce cylindre protecteur doit être fixé au four pour éviter le réservoir du thermomètre vers



le haut et vers le bas, sur une hauteur de 1,5 à 2 cm. Le rôle de ce tube cylindrique protecteur est de permettre la circulation de la vapeur autour du réservoir du thermomètre, tout en empêchant le rayonnement du four d'atteindre directement la résistance de mesure (140).

De même, pour éviter le rayonnement du thermomètre vers les parties froides supérieures, on ajoute, au-dessus du cylindre protecteur, un écran conique *c* s'ajustant exactement à sa partie supérieure sur le tube de protection *t* et laissant, entre *C* et *E*, une hauteur d'au moins 1 cm pour permettre la libre circulation de la vapeur. Le réglage de la puissance dépensée dans l'enroulement de chauffe doit être tel que, en régime permanent, la vapeur de soufre vienne se condenser à environ 1 cm au dessus de la partie supérieure du tube réfractaire entouré de calorifuge.

Il est recommandé également de régler le régime d'ébullition, d'abord en l'absence du thermomètre et de son écran protecteur, et de plonger ensuite le thermomètre et son écran lorsque le régime permanent d'ébullition est atteint. Bien entendu, il y a lieu, comme pour le point 100°, de mesurer avec soin la pression atmosphérique du moment.

Lorsque les trois résistances auront été mesurées pour les trois points fixes utilisés, on calculera les trois coefficients de la formule d'interpolation et on dressera un tableau donnant en regard les valeurs de *R* et de *t* (de degré en degré) (Tableau X, p. 65).

38. Thermomètres à résistance utilisés dans la pratique industrielle. — Pour les opérations courantes de la pratique industrielle, le thermomètre décrit ci-dessus possède un peu de robustesse. On a proposé diverses solutions pour rendre l'instrument plus solide ; on



peut, en particulier, enrouler un fil fin de platine de diamètre 0,1 mm sur une tige de quartz fondu de diamètre 4 mm environ. On dispose autour de l'enroulement un tube mince de quartz fondu que l'on fond ensuite au chalumeau, de façon à enrober complètement la résistance de platine dans la silice fondue. Cette disposition a évidemment l'avantage de protéger la résistance contre les causes de détérioration. Elle fournit aussi une très faible inertie, en raison de la très grande conductibilité calorifique de la silice.

Toutefois, pour des mesures de précision, une telle disposition pourrait entraîner diverses causes d'erreur surtout aux basses températures, la différence de dilatation du platine et de la silice provoquant des tensions mécaniques de l'enroulement.

Pour des températures qui ne dépassent pas 300° C, on peut utiliser des thermomètres à enroulement de nickel. Pour de tels enroulements, une formule d'interpolation de la forme $\log R = a + bt$ convient très bien ; la graduation pourra s'effectuer au moyen de deux des points fixes secondaires que nous reproduisons à la fin de l'ouvrage (Tableau XIV, p. 215).

39. Mesures au pont de Wheatstone non équilibré.

— La figure 20 rappelle le montage général du pont de Wheatstone (X, résistance du thermomètre ; R_1 , R_2 , R_3 , résistances en manganine). Un galvanomètre G est branché entre les deux points D et E du pont. Les résistances sont choisies de façon que, pour la plus basse température t_0 que doit fournir l'instrument, le galvanomètre ne

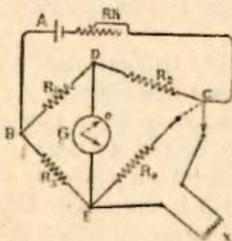


FIG. 20.

donne aucune déviation. Si la température du thermomètre s'élève, X se modifie, le pont cesse d'être équilibré et le galvanomètre G dévie. Par une graduation appropriée, on fera correspondre à chaque point de l'échelle une valeur correspondante de la température.

La graduation ainsi réalisée suppose évidemment constante la différence de potentiel entre B et C . Pour régler cette différence de potentiel avant chaque série de mesures, on débranche le thermomètre et on intercale à sa place une résistance de contrôle R_c qui correspond, en général, à la valeur de X pour la plus haute température de la graduation ; on agit sur le rhéostat R_h de façon à ramener l'aiguille à la division correspondante.

L'appareil de mesure G fonctionne en millivoltmètre. Il doit donc être compensé des variations de température extérieure. Pour un appareil non compensé avec bobinage en cuivre, dont la résistance varie de $1/300$ par degré, une variation de la température extérieure égale à 10° entraînerait dans la mesure de X une erreur relative de $1/30$, tout à fait inadmissible.

On remarquera également que la graduation d'un tel instrument n'est pas rigoureusement linéaire ; il conviendra donc d'adopter plusieurs points repères entre lesquels on interpolera la graduation.

40. Galvanomètre à cadres croisés. — Dans la pratique des mesures au thermomètre à résistance, on tend de plus en plus à utiliser un galvanomètre sans spiral, fait de deux cadres différents, calés ensemble ayant un angle 2θ de 40 à 50° ; les courants sont amenés aux deux cadres par des rubans. Ces cadres se déplacent entre les pôles N et S d'un aimant (fig. 21). Certains constructeurs ajoutent un noyau central tel



que, dans l'entrefer, le champ magnétique n'est pas uniforme.

Si l'on désigne par i_1 et i_2 les courants dans chacun des cadres, ces courants étant d'ailleurs de sens tel que les couples électro-magnétiques agissant sur les cadres s'opposent, l'ensemble tournera à partir de sa position d'équilibre d'un angle α et les deux couples, qui s'équilibrent alors, peuvent s'écrire :

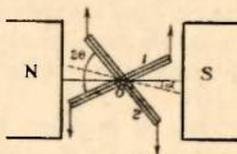


FIG. 21.

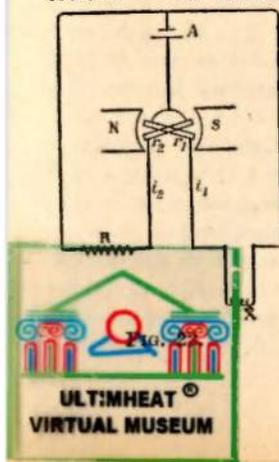
$$\Gamma_1 = K_1 i_1 \cos (\theta - \alpha), \quad \Gamma_2 = K_2 i_2 \cos (\theta + \alpha),$$

d'où l'on déduit la relation :

$$(9) \quad \frac{i_2}{i_1} = \frac{K_1}{K_2} \frac{\cos (\theta - \alpha)}{\cos (\theta + \alpha)} = f(\alpha).$$

L'appareil, appelé quelquefois quotientmètre, donne une mesure directe du rapport $\frac{i_1}{i_2}$.

41. Montage différentiel avec galvanomètre à cadres croisés. — Le montage est donné par la figure 22 :



R, résistance sans coefficient de température ; A, accumulateur ; r_1 , r_2 , cadres du galvanomètre ; X, résistance du thermomètre. L'instrument, dans lequel nous supposons les deux cadres identiques, indiquera une déviation nulle pour la température t_0 à laquelle $X = R$. Si X change, l'instrument tournera d'un angle α tel que l'on ait (form. 9) :

$$f(\alpha) = \frac{i_2}{i_1} = \frac{X}{R}$$

L'indication de l'instrument est, comme on le voit, indépendante de la f.e.m. de l'accumulateur. On peut, comme dans le montage précédent, substituer à X une résistance de contrôle R_c , cette résistance ayant simplement pour but de vérifier la fidélité du galvanomètre.

Dans notre calcul, nous n'avons pas fait intervenir la résistance r de chacun des deux cadres, toujours bobinée en fil de cuivre. En réalité, la formule précédente doit s'écrire :

$$f(\alpha) = \frac{X + r}{R + r}$$

Comme r dépend de la température extérieure, l'appareil donnera des indications qui seront fonction de cette température. A titre d'exemple, supposons $X = 10 \Omega$ à 0° et 20Ω à 300° ; $R = 10 \Omega$, $r = 20 \Omega$ à 20° et $19,3 \Omega$ à 10° . Une même déviation α donnera, aux deux températures extérieures 20 et 10° , deux résistances X et X' fournies par la relation :

$$\frac{X + 20}{10 + 20} = \frac{X' + 19,3}{10 + 19,3}$$

Au voisinage de 300° et pour $X = 20$, la formule précédente donne $X' = 19,77$. Cette différence $X - X'$ correspond à une erreur en température d'environ 7° .

42. Montage en pont de Wheatstone avec galvanomètre à cadres croisés. — Un tel montage est donné par la figure 23 : A, accumulateur d'alimentation ; R, résistances sans coefficient de température ; X, résistance à mesurer. L'instrument de mesure est un galvanomètre à cadres croisés dans lequel C_1 (cadre de mesure) est branché entre B et C ; C_2 (cadre de mesure) est branché entre D et E.



La résistance r de chacun des deux cadres doit être grande, l'appareil fonctionnant, en réalité, comme voltmètre. Si l'on désigne par E la f.e.m. de l'accumulateur, et si l'on suppose r très grand par rapport à R et X , le courant i_1 dans C_1 est donné par : $i_1 = \frac{E}{r}$.

Les courants i et i' dans les branches respectives B, D, C et B, E, C ont pour valeur : $i = \frac{E}{2R}$ $i' = \frac{E}{R+X}$ et le courant dans C_2 est donné par :

$$i_2 = \frac{R(i - i')}{r} = \frac{E}{r} \left[\frac{1}{2} - \frac{R}{R+X} \right],$$

de sorte que la déviation de l'instrument, fonction seule-

ment du rapport $\frac{i_2}{i_1}$, est donnée par :

$$f(\cdot) = \frac{1}{2} - \frac{R}{R+X}.$$

Comme on le voit, les quantités E et r s'éliminent, de sorte que l'instrument se trouve avoir l'avantage du montage à cadres croisés (non influence de la f.e.m.) et, de plus, fournit des indications indépendantes de la température de l'instrument de mesure, ce qui supprime l'obligation de compenser ce dernier. Aussi la tendance actuelle des constructeurs est d'adopter exclusivement le montage ci-dessus.

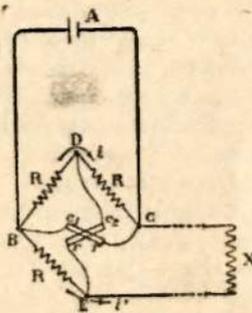


FIG. 28.



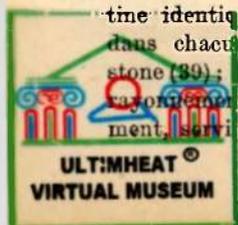
43. Causes d'erreur dans les mesures industrielles.
En dehors des causes d'erreur signalées plus haut,

une source d'erreur, qui peut être importante, intervient dans toutes les mesures effectuées au moyen du thermomètre à résistance à 2 fils. Les fils de jonction entre les bornes de l'instrument et la résistance de mesure proprement dite sont en effet portés à des températures variant avec la profondeur d'immersion du thermomètre dans l'enceinte. Il est difficile de réduire la résistance de ces fils de jonction ; cela conduirait à leur donner une assez grande section et la résistance de mesure, du fait des pertes de chaleur par conductibilité, pourrait se trouver à une température inférieure à celle de l'enceinte. Il est prudent, dans de telles mesures, d'enfoncer le thermomètre toujours de la même quantité dans l'enceinte.

Lorsque l'appareil sert comme indicateur ou enregistreur à distance, l'addition de câbles peut modifier très notablement sa graduation. On la rétablira en diminuant par exemple une résistance de réglage placée dans le circuit de mesure. Il reste entendu, d'ailleurs, que les câbles de jonction, nécessairement en cuivre, ont un coefficient de température élevé, et qu'il importera de se protéger contre des variations notables de température, en les enterrant par exemple.

44. Mesure de très faibles échauffements. Bolomètre.

— Dans certaines études destinées à mesurer les variations de température très faibles, par exemple dans les études de rayonnement ou de convection, on utilisera le dispositif déjà ancien, connu sous le nom de bolomètre. L'appareil comprend deux lames de platine identiques, de quelques μ d'épaisseur, disposées dans chacune des branches d'un pont de Wheatstone (39) ; l'une de ces lames, noircie, sera exposée au rayonnement ; l'autre, protégée contre ce rayonnement, servira à compenser les variations de tempéra-



ture extérieure. Un tel dispositif, monté avec un galvanomètre très sensible, permet de mesurer des échauffements nettement inférieurs au 1/100 000 de degré.

45. Thermomètres à résistance pour très basses températures. — Le thermomètre à résistance de platine gradué au moyen de la formule 5 (6) peut servir jusqu'à des températures de l'ordre de -200° C. Nous n'insisterons pas sur les diverses formules qui ont été proposées pour prolonger sa graduation jusqu'à ces températures, nous nous contenterons de reproduire ci-dessous (Tableau XI) les valeurs du rapport R/R_0 .

Au-dessous de 5° K la résistance électrique du platine devient pratiquement constante et ce métal ne peut plus servir comme résistance thermométrique ; on peut alors utiliser le bronze phosphoreux¹ ou le constantan.

TABLEAU XI. — Valeurs de la résistance électrique du platine au-dessous de 0°

(La résistance est prise égale à l'unité pour 0°).

t ($^{\circ}$ C)	R	$\frac{dR}{dt} 10^3$	t ($^{\circ}$ C)	R	$\frac{dR}{dt} 10^3$
0	1,000	3,97	— 140	0,430	4,21
-- 10°	0,960	3,98	— 150	0,387	4,23
-- 20	0,920	4,00	— 160	0,347	4,26
-- 30	0,880	4,01	— 170	0,302	4,29
-- 40	0,840	4,02	— 180	0,259	4,32
-- 50	0,800	4,04	— 190	0,216	4,33
-- 60	0,759	4,05	— 200	0,173	4,26
-- 70	0,719	4,07	— 210	0,129	4,1
-- 80	0,678	4,08	— 220	0,087	3,4
-- 90	0,637	4,10	— 230	0,048	2,2
-- 100	0,596	4,12	— 240	0,022	1,4
-- 110	0,558	4,14	— 253	0,006	0,6
-- 120	0,513	4,16	— 269	0,0016	
-- 130	0,471	4,18	— 272	0,0016	

1. Voir REICH, *J. de Physique*, 5, p. 374 (1934).



CHAPITRE V

COUPLES THERMO-ÉLECTRIQUES

46. Couple thermoélectrique international de précision. — Comme dans les chapitres précédents, nous insisterons d'abord sur l'appareil adopté comme instrument international d'interpolation. Ce couple, Pt-90 Pt 10 Rh, a été proposé dès 1887 par Le Chatelier, qui a montré tout le parti qu'on pouvait en tirer dans les mesures de précision.

La Convention générale des poids et mesures l'a adopté pour toute la partie de l'échelle comprise entre 660 et 1 100° C, alors qu'elle a rejeté l'emploi du thermomètre à résistance de platine dans ce domaine de températures. Le fait tient à ce qu'une altération, même légère, du fil de platine est susceptible de modifier notablement sa résistance électrique, alors qu'elle est sans influence sensible sur la f.e.m. du couple Pt-Pt Rh.

En ce qui concerne le choix du métal allié au platine, l'iridium, comme l'a montré Le Chatelier, convient beaucoup moins bien que le rhodium, en raison de sa plus facile évaporation à haute température.

Des critères de reproductibilité d'un tel couple ont été établis comme suit. Le fil de platine pur doit remplir les conditions de pureté précisées à propos



du thermomètre à résistance (30 bis) : $\frac{R_{100}}{R_0} > 1,390$.

Pour le fil de platine rhodié la teneur en rhodium doit être telle que le couple fournit, au point de fusion de l'or, une f.e.m. comprise entre 10 200 et 10 400 μ V. En ce qui concerne le diamètre du fil, un fil trop fin conduirait à une altération trop rapide ; un fil trop gros pourrait comporter, dans certains cas, d'assez fortes corrections de conductibilité calorifique. Le diamètre adopté a été de 0,50 mm avec une marge en plus ou en moins de 0,15 mm.

Il importe de recuire le couple avant son étalonnage, de façon à détruire les tensions dues à l'écroutissage produit au moment de l'étirage des fils. Pour cela, on le chauffera électriquement à 1 200 ou 1 300° C pendant un temps prolongé (6 à 8 heures au moins).

47. Étude de l'homogénéité d'un couple. — Si l'on veut faire servir un couple à des mesures précises, il faut s'assurer que les deux fils ne présentent pas de défauts notables d'homogénéité, lesquels entraîneraient des forces thermoélectriques parasites locales.

Ce contrôle est particulièrement indispensable pour un couple qui a pu servir à des températures élevées pendant un temps prolongé : la partie du couple plongée dans l'enceinte se modifie et entraîne, pour la partie des fils située dans la zone de gradient de température élevée, de grands défauts d'homogénéité. La méthode de contrôle d'un fil consiste à le comparer, point par point, avec un autre fil n'ayant subi aucune modification de température.

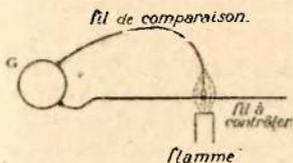


FIG. 24.



pas servi (fig. 24). Le fil à étudier sera branché à l'une des bornes d'un galvanomètre sensible G et tendu horizontalement; le fil de comparaison branché à l'autre borne du galvanomètre sera muni, à son autre extrémité, d'une petite boucle que l'on fera glisser le long du fil à étudier. Le point de jonction des deux fils est chauffé dans une flamme ou, mieux, dans un petit four électrique fournissant une température de l'ordre de 1 200°. La f.e.m. thermoélectrique ainsi établie entre les deux fils que l'on compare, sera donnée directement par le galvanomètre dont il importe de connaître la sensibilité au courant et la résistance intérieure. La f.e.m. ainsi mesurée doit rester constante à quelques μV près. Bien entendu, si le fil présente de gros défauts d'homogénéité, on le rejettera pour toute mesure quelque peu précise.

La soudure des deux fils du couple s'effectue en les tortillant ensemble sur 3 à 5 mm, puis en plongeant la pointe du tortillon dans le dard d'un chalumeau gaz-oxygène jusqu'à constituer un globule fondu que l'on fera progresser jusqu'à la jonction des deux fils.

48. Mesure de la force électro-motrice du couple. Méthode potentiométrique. — Dans toutes les mesures de précision, on mesurera la f.e.m. par la méthode potentiométrique, les deux soudures froides étant toutes deux portées à la température de 0°; la figure 25 donne le schéma d'ensemble du montage. La soudure chaude S est placée dans l'enceinte; les deux fils platine-platine rhodié sont soudés ou serrés sur deux fils de cuivre allant au potentiomètre, les points de jonction constituant les deux soudures froides S₁ S₂. Pour réaliser commodément la température 0° autour de ces soudures, on utilise un vase Dewar contenant de la glace pure, humectée d'eau distillée; on y plonge



deux tubes de verre T_1 T_2 au fond desquels sont placées les soudures S_1 S_2 . Deux petits tubes de protection t_1 t_2 servent à isoler électriquement les deux fils aboutissant à une même soudure. Enfin, pour assurer un bon contact entre chacune des soudures froides et le bain de glace, on peut déposer quelques gouttes d'huile au fond des tubes T_1 T_2 .

Le schéma du montage potentiométrique est indiqué également sur la figure 25. Le courant potentiométrique

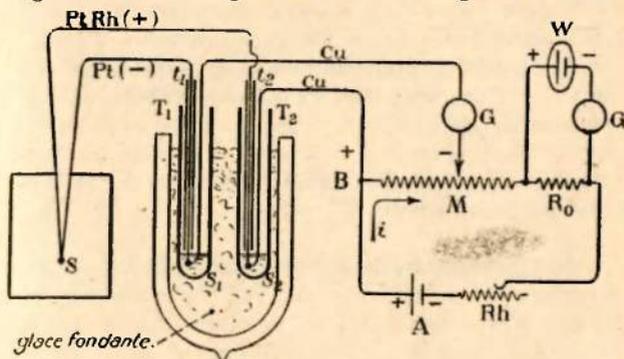


FIG. 25.

que i est maintenu constant, grâce à une pile étalon Weston W branchée aux bornes d'une résistance R_0 du pont. La f.e.m. à mesurer est opposée à une partie réglable BM de la résistance potentiométrique au moyen d'un curseur M . Nous renverrons le lecteur aux ouvrages spéciaux pour tous détails relatifs aux divers modèles de potentiomètres. Le potentiomètre destiné aux mesures doit permettre d'évaluer des f.e.m. comprises entre 5 et 15 mV .



des couples autres que les couples platine-rhodié,

La f.e.m. du couple étant d'environ $10 \mu\text{V}$ par degré, le 1/10 de degré correspond pratiquement à $1 \mu\text{V}$. Des mesures effectuées au 1/100 de degré nécessitent l'emploi de potentiomètres spécialement étudiés pour éviter les f.e.m. parasites dans les circuits potentiométriques, lesquelles atteignent ou dépassent même $1 \mu\text{V}$ dans un potentiomètre mal construit.

On peut improviser soi-même un montage potentiométrique donnant toute satisfaction, en disposant en série deux boîtes de résistance identiques. Le couple sera branché aux bornes de l'une des boîtes, l'équilibrage du galvanomètre est obtenu en transportant des fiches de l'une des boîtes dans leur emplacement correspondant de l'autre ¹. Une résistance supplémentaire, disposée dans le circuit potentiométrique, permet, grâce à une pile étalon, de contrôler et régler le courant potentiométrique.

49. Potentiomètre incomplètement équilibré. — En pratique, dans beaucoup de cas, on ne s'astreint jamais à ramener toujours exactement le galvanomètre G au zéro. Par exemple lorsqu'il s'agit de suivre la montée d'une température au voisinage d'une valeur donnée, on fixera le curseur du potentiomètre sur la valeur correspondante de la f.e.m. Les différences seront alors lues sur l'échelle du galvanomètre. On déterminera la constante de cette échelle, c'est-à-dire le nombre de microvolts correspondant à 1 mm de l'échelle en notant les positions du spot pour deux f.e.m. voisines indiquées par le potentiomètre. Avec un galvanomètre sensible, un degré peut correspondre à un déplacement de l'ordre du centimètre.

La marge de mesure doit être plus grande (jusqu'à 50 millivolts pour les couples Nickel-chrome).

¹. Il faut, bien entendu, de ne garder qu'un jeu de fiches pour deux boîtes de résistance.



50. Potentiomètres à déviation. — Lorsque l'on ne désire pas faire l'acquisition d'un potentiomètre à curseur de précision, en général assez coûteux en raison du soin à apporter aux contacts glissants, on peut adopter des potentiomètres à déviation, de construction beaucoup plus simple et dont la fabrication peut même être entreprise dans un laboratoire quelque peu outillé. Un tel potentiomètre sera, dans le cas qui nous intéresse, constitué par un circuit potention-

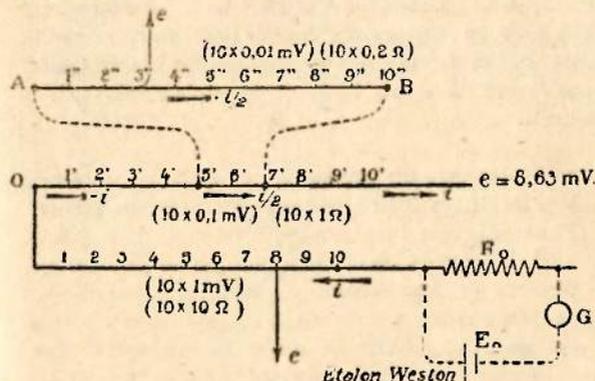


FIG. 26.

métrique, comportant une résistance R_0 , destinée à l'équilibrage de la pile-étalon E_0 et par un ensemble de 10 tranches de résistance, correspondant chacune à 1 mV, suivi d'un ensemble de 10 tranches correspondant chacune à 1/10 mV. Si le couple est branché entre les bornes numérotées 8 et 3' de la figure 26, la f.e.m. mesurée est égale à 8,3 millivolts, du moins si le galvanomètre marque zéro. Pour obtenir les fractions inférieures à 0,3 mV, on interpolera sur l'échelle du



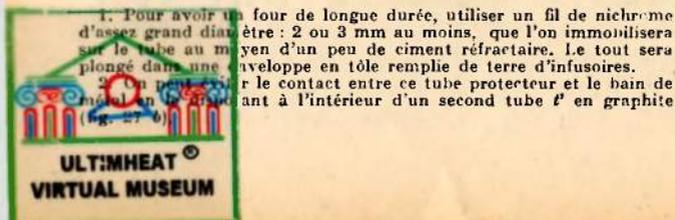
galvanomètre au moyen de deux lectures effectuées sur les plots 3' et 4'. Si le galvanomètre a une résistance intérieure très grande par rapport à la résistance du circuit potentiométrique comprise entre les plots 10 et 10', ou si l'on a soin d'ajouter en série sur le galvanomètre une résistance suffisante, on pourra avoir une constante indépendante de la f.e.m. mesurée.

On peut compliquer un peu le potentiomètre en ajoutant un dispositif classique, qui comporte 10 tranches dont les extrémités A B sont branchées sur deux plots pairs ou impairs consécutifs ; on trouvera sur la figure 26 les valeurs des résistances de ces tranches. Dans le cas de figure la f.e.m. mesurée serait égale à 8,63 mV.

51. Étalonnage du couple platine-platine rhodié aux trois points fixes internationaux. Méthode du creuset.

— Pour effectuer l'étalonnage du couple aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or, on utilisera un four chauffé électriquement au moyen d'une résistance en nichrome bobinée sur un tube réfractaire¹. La fusion de ces trois corps est effectuée dans un creuset C de graphite pur (fig. 27, a), substance qui a l'avantage de se travailler commodément au tour et de ne pas contaminer les trois corps précédents.

Le tube *t* protecteur du couple traverse un couvercle de graphite placé sur le creuset². Enfin, dans le cas de l'argent, on évite l'absorption de l'oxygène par le métal, en disposant un peu de graphite en poudre



à sa surface. Des écrans protecteurs contre le rayonnement E E' sont disposés au-dessus et au-dessous du creuset de fusion, de façon à assurer une meilleure uniformité de température dans le four. Le circuit de chauffage comportera une bonne résistance de réglage et un ampèremètre destinés à régler le chauffage, de façon que la montée de la température ou sa descente, un

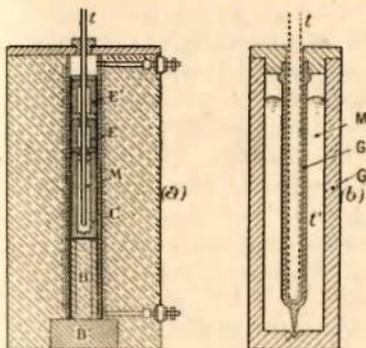


Fig. 27.

peu avant la fusion ou la solidification, s'effectuent suffisamment lentement (quelques degrés par minute). Si l'on veut en effet avoir des paliers de fusion et de solidification suffisamment nets, il importe que leur durée soit d'au moins 5 minutes.

L'antimoine, qui présente assez facilement des phénomènes de surfusion, ne devra pas être chauffé trop au-dessus de son point de fusion. Pour chacun des métaux repères, les paliers de fusion ou de solidification doivent correspondre à une constance de la température de l'ordre de $1 \mu V$. Par ailleurs, les paliers de fusion et de solidification doivent être identiques à moins de $2 \mu V$ près.

On trouvera ailleurs (61) les détails sur le tube de protection du couple. Toutefois, pour éviter la rupture de ce tube protecteur, aussitôt après la fin de la solidification on réchauffera le métal jusqu'à la fusion et on sortira le tube du bain. Si le tube restait plongé dans le bain solide jusqu'à la température ordinaire, la diffé-

rence de dilatation du métal et de la porcelaine entraînerait de fréquentes ruptures.

52. Profondeur d'immersion dans le métal. — Si l'on veut que la température mesurée par un couple soit identique à la température du métal, on utilisera des tubes de protection de diamètre faible et suffisamment immergés dans le bain métallique (8 cm au moins pour un tube de diamètre 6 mm) (137, 138). Nous mettons en garde contre les erreurs que l'on pourrait commettre en adoptant des profondeurs d'immersion trop faibles ou des tubes de protection de trop grand diamètre. La Convention Internationale précise d'ailleurs que le couple et son tube de protection pourront être élevés ou abaissés de 1 cm dans le bain sans que la variation de la f.e.m. du palier soit supérieure à $1 \mu\text{V}$. Il va de soi que la masse de métal à utiliser est relativement importante ; pour un creuset de diamètre 25 mm, de hauteur 13 cm, et pour l'or, elle est d'environ 1 kg.

53. Méthode de fusion d'un fil. — Lorsque l'on veut contrôler la f.e.m. d'un couple au point de fusion de l'or, sans rechercher une extrême précision, on peut utiliser la méthode de fusion d'un fil, qui présente l'avantage de nécessiter une très faible quantité de matière. Dans ce but, entre les deux fils du couple, on soude un fil d'or de diamètre 0,5 mm environ et de longueur 5 à 8 mm ; ce fil est plongé dans un four à résistance de nichrome. Aucune précaution spéciale ne sera prise pour uniformiser la température au sein du four ; il suffit de plonger les extrémités des fils du couple, entourés d'un tube protecteur, dans un bloc de graphite pur, dont les parois auront une épaisseur de 10 mm. On réglera avec grand soin une mon-



tée lente de la température (1 à 2° par minute). Le curseur du potentiomètre sera fixé sur une f.e.m. voisine de celle correspondant au point de fusion de l'or, et on suivra la montée de la température sur l'échelle du galvanomètre.

On tracera la courbe qui donne la position du spot en fonction du temps, la lecture s'effectuant, par exemple, toutes les 15 secondes. On observe un palier dont la durée peut atteindre facilement deux minutes : à la fin de ce palier, se produit une légère remontée du spot qui précède immédiatement la rupture du fil, c'est-à-dire le retour au zéro du spot du galvanomètre.

Cette méthode offre, évidemment, moins de sécurité que la méthode du creuset. Elle ne permet pas, en particulier, d'observer le palier de solidification ; bien conduite, elle fournit néanmoins des nombres concordants à 0,1 degré près¹.

54. Interpolation de la graduation du couple. — Les trois f.e.m. mesurées pour Sb, Ag et Au permettront de calculer les trois coefficients de la formule $e = a + bt + ct^2$. La f.e.m. du couple sera exprimée, en μV , par une formule analogue à la suivante : $e = -307,5 + 8,2294 t + 0,00165 t^2$. On établira une table à double entrée donnant, en regard, les valeurs correspondantes de e et de t .

Il est bien entendu que l'extrapolation de la formule précédente, au-dessous du point de fusion de Sb et au dessus de celui de Au, ne pourra porter que sur un intervalle d'une cinquantaine de degrés. En particulier, dans la formule, e ne tend pas vers zéro, ce qui est contraire à l'expérience. Au-dessus du point de



1. La méthode ne convient pas pour l'argent, qui absorbe énergiquement l'oxygène de l'air. Par contre, elle convient pour le palladium et le platine.

1. La méthode ne convient pas pour l'argent, qui absorbe énergiquement l'oxygène de l'air. Par contre, elle convient pour le palladium et le platine.

fusion de l'or, nous avons déjà signalé qu'il y avait discordance entre l'échelle du couple platine-platine rhodié et l'échelle thermodynamique (7).

55. Évolution des couples. — Un couple subit, au cours de son usage, des modifications entraînant une variation de sa f.e.m. Cette évolution tient surtout à l'évaporation lente du rhodium qui modifie la teneur du fil de platine rhodié. Si le couple est très bien protégé contre l'altération chimique, cette évolution reste extrêmement lente pour des températures ne dépassant pas 1 100° C.

Des chiffres ont été publiés relativement à cette vitesse d'évolution, ils n'ont rien d'absolu ; ils dépendent, en effet, du diamètre des fils utilisés dans le couple et de la contamination par des corps étrangers. De façon générale, les couples de grand diamètre présentent une évolution beaucoup moins rapide.

Aux températures plus élevées, 1 500° C par exemple, l'évolution est extrêmement rapide, ce qui conduit à abandonner le couple comme instrument de précision. La partie portée à haute température s'appauvrit assez rapidement en rhodium, ce qui entraîne une très grande hétérogénéité du fil. Pour de telles mesures, il est bon d'envoyer un léger courant d'oxygène dans le tube protecteur. On doit en outre effectuer un contrôle très fréquent en reprenant le point d'or par la méthode du fil.

56. Mesures de demi-précision. — On utilise, dans les mesures courantes, des potentiomètres portatifs simplifiés dans lesquels le contrôle du courant potentiométrique est effectué au moyen d'un ampèremètre (Dr. 28) muni d'un trait de repère, de façon à éviter l'emploi d'une pile-étalon dont le transport



est délicat. Bien entendu, un tel ampèremètre limitera la précision de la méthode et ne permettra pas, même avec un très bon instrument, de dépasser une précision de $1/500$; pour un appareil de type courant, cette précision pourrait être limitée au $1/100$, ce qui entraîne des erreurs en température inadmissibles.

L'équilibrage du circuit du couple sera obtenu au moyen d'un galvanoscope de zéro g .

Dans beaucoup de potentiomètres simplifiés, ainsi réalisés, la résistance potentiométrique DCE est constituée par un fil circulaire sur lequel se déplace un curseur C , entraînant un index sur une graduation en degrés. Pour certaines mesures, on réalise aisément un dispositif à lecture directe, avec potentiomètre non équilibré, en fixant le curseur sur une position de la résistance DCE, les températures étant alors lues sur une graduation portée par le galvanomètre g . Si, par exemple,

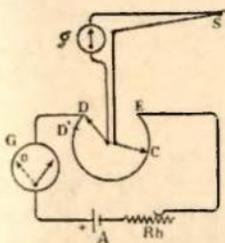


FIG. 28.

les mesures doivent être effectuées entre 800 et 1000° , le curseur sera fixé sur le point de DE correspondant à 900° ; les déplacements du galvanomètre g de part et d'autre de sa position d'équilibre représenteront un intervalle de 100° . Avec un tel dispositif, on peut obtenir une grande sensibilité pour un intervalle de températures restreint. Le dispositif peut d'ailleurs servir pour le réglage automatique de la température d'un réacteur destiné à chauffer un fluide.



ULTIMHEAT[®]
VIRTUAL MUSEUM

57. Mesure de la force électromotrice au millivoltmètre. — Dans les mesures courantes on peut utiliser, comme instrument de mesure de la f.e.m. du couple, un millivoltmètre gradué jusqu'à 15 mV. L'industrie fabrique actuellement de tels millivoltmètres avec suspension à pivots. L'emploi de ces instruments nécessite quelques précautions, si l'on veut ne pas risquer de commettre d'assez grossières erreurs.

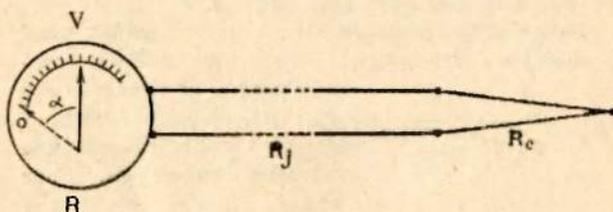


FIG. 29.

Si l'on se reporte au schéma de la figure 29, et si l'on désigne par e la f.e.m. du couple, par R , R_j , R_c les résistances du couple, des fils de jonction et du millivoltmètre, la déviation α est fournie par la relation :

$$\alpha = k \frac{e}{R_c + R_j + R}$$

En premier lieu, si l'on vient à plonger le couple plus ou moins profondément dans l'enceinte, sa résistance peut différer de quantités qui, même pour des fils assez gros, sont de l'ordre de 1Ω . Si l'on veut que la déviation α soit indépendante de cette profondeur d'immersion, il importe que la résistance R du millivoltmètre soit très grande par rapport à celle du couple. Un millivoltmètre de résistance 100Ω

1. La bobine de 0,4 mm de diamètre et de 1 m de longueur a une résistance d'environ 1Ω à 0° et de 4Ω à 1000° .



pourrait introduire des erreurs de l'ordre de $1/100$, c'est-à-dire de 10° au voisinage de $1\ 000^\circ$; la précision du millième nécessite un millivoltmètre de résistance intérieure voisine de $1\ 000\ \Omega$. A ce point de vue il faut également préciser que la graduation d'un tel millivoltmètre, effectuée en degrés, se trouverait défectueuse si l'on modifie le diamètre des fils des couples et leur longueur, ou la résistance des fils de jonction. Pour des indicateurs à distance, dans lesquels les fils de jonction peuvent être très longs, le constructeur prévoit souvent une résistance montée en série sur le millivoltmètre et dont on change la valeur si l'on vient à modifier le circuit du couple.

Enfin, il est indispensable que le millivoltmètre soit très exactement compensé des variations de la température extérieure. Un instrument non compensé, bobiné avec du fil de cuivre dont la résistance varie de $1/300$ par degré, donnerait, pour une variation de la température extérieure de 10° , des erreurs en température qui, au voisinage de $1\ 000^\circ$, seraient de l'ordre de 30° . On pourra bobiner le cadre avec des fils de constantan ou de manganine.

Nous n'insisterons pas sur divers autres dispositifs adoptés par les constructeurs pour obtenir la compensation; au moment de l'acquisition d'un tel instrument, il est prudent de demander des garanties.

Il est en outre recommandé d'adopter des instruments comportant, en dehors de la graduation en degrés, une graduation en millivolts ou, à défaut, un point de repère sur l'échelle correspondant à une f.e.m. connue, de façon à pouvoir, à tout instant, contrôler la fidélité de l'instrument lui-même au moyen d'un montage potentiométrique.

La précision d'un tel instrument reste toujours constante pour des mesures de précision. Une échelle,

de longueur 12 cm environ pour un intervalle de température de 1 200°, fournit un écart de 10° par mm. L'évaluation du degré est tout à fait illusoire, d'autant que la fidélité de l'appareil dépasse rarement 1/500.

58. Tables de référence pour couples platine-platine rhodié à 10 0/0. — Bien que l'utilisation du couple Le Chatelier ne soit prévue, dans la Convention internationale, que dans l'intervalle 600-1 100° C, il est possible de le faire servir dans toute l'étendue de l'échelle qui va de 0° à 1 700° C.

On trouvera à la fin de l'ouvrage la table de référence actuellement la plus sûre fournissant la correspondance entre les températures d'un couple platine-platine rhodié à 10 % et sa f.e.m. en μV . Cette table est établie pour un couple dont la f.e.m. au point de fusion de l'or est de 10 300 μV , c'est-à-dire la moyenne des valeurs admises par la 7^e Convention générale des poids et mesures. Au voisinage des températures 0°, 600°, 1 100° et 1 700° C les variations de la force électromotrice sont respectivement de 5,6, 10,2, 11,8 et 11,6 μV par degré.

59. Interchangeabilité des couples Pt-Pt Rh. — Dans la pratique courante, il est intéressant de disposer de couples dont l'identité est aussi grande que possible, de façon à pouvoir substituer un couple neuf à un couple usagé, sans avoir à modifier l'échelle de température repérée pour l'ancien couple. L'industrie est arrivée à réaliser des couples dont les f.e.m. ne diffèrent entre elles que de quantités assez faibles, correspondant, par exemple, à 3 ou 4° à la température de fusion de l'or¹.

¹ Bien que nous nous soyons interdit de donner, dans notre ouvrage, aucune indication commerciale, nous croyons devoir signaler que les



Pour comparer deux couples on peut évidemment les étalonner individuellement, au point de fusion de l'or par exemple. Il est préférable de les comparer par une méthode directe dans laquelle on oppose leurs f.e.m. Le montage de mesure est donné par la figure 30.

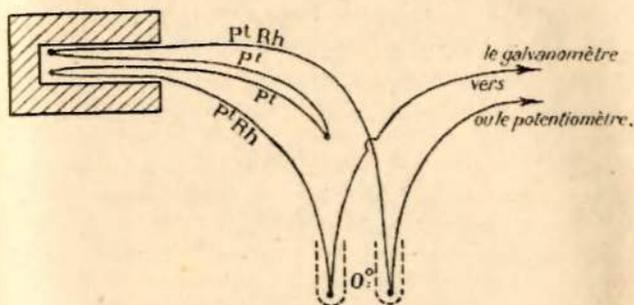


FIG. 30.

Les deux soudures Cu-Pt Rh sont plongées dans la glace ; la soudure des deux fils de platine, toujours assez identiques, peut être sans inconvénient laissée à l'air libre.

Ce montage a l'avantage de permettre l'étude de la différence des f.e.m. des couples en fonction de la température du four, laquelle n'a d'ailleurs pas besoin d'être connue avec précision. On peut alors tracer une courbe donnant la différence Δe en fonction, soit de e , soit de t . L'expérience montre que, du moins pour des couples assez voisins, la différence Δe est très sensiblement proportionnelle à e ou à t , ce qui permet d'obtenir la graduation d'un couple par rap-



port à un autre préalablement étalonné. Si, par exemple, un couple donne, au point de fusion de l'or, 10 200 μ V au lieu de 10 300, valeur admise dans la table de références (58), on peut admettre que les différences des f.e.m. seront respectivement 50, 100 et 150 μ V aux températures respectives 600, 1 100 et 1 700° C, ce qui conduit à des corrections de température égales à 5, 8,5, 13°. Le problème se pose d'ailleurs de la même

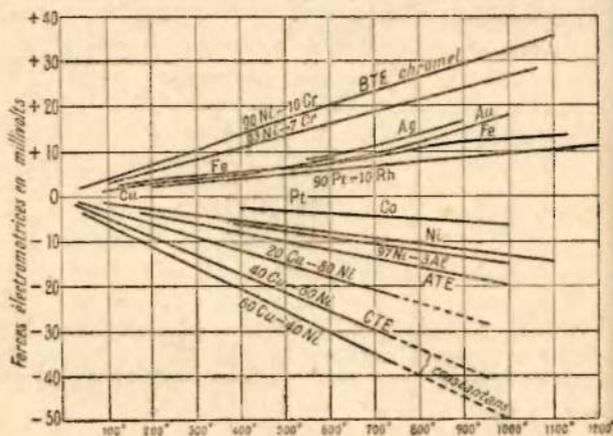


FIG. 31.

façon pour un couple qui aurait subi, depuis son étalonnage, une modification de sa f.e.m.

Pour ne pas avoir à changer la graduation faite sur le millivoltmètre de mesure, on peut ajouter ou supprimer une résistance convenable entre le couple et l'appareil de mesure.



alliages, et rapportées au platine comme métal de référence. Pour obtenir la f.e.m. d'un couple fait de métaux différents, il suffit d'ajouter ou de retrancher les ordonnées relatives aux deux métaux, à la température considérée.

Nous allons donner quelques indications sur les métaux ou alliages utilisés, soit dans le but d'obtenir des f.e.m. plus grandes qu'avec le couple Pt-Pt Rh., soit que l'on cherche à atteindre des températures plus élevées.

Pour certaines applications spéciales, en particulier pour des études à la température de fusion du platine, on a pu utiliser un couple Pt Rh 30 %, Pt Rh 20 %, dont les f.e.m. ne diffèrent pas sensiblement de celles du couple Le Chatelier ordinaire. Les couples faits d'alliages de platine ont l'inconvénient de fournir des f.e.m. relativement faibles, de l'ordre de 10 mV seulement pour 1 000°.

Pour avoir une plus grande f.e.m., on utilisera jusqu'à 350° un couple cuivre constantan, et jusqu'à 700° un couple fer-constantan (sensibilité de l'ordre de 50 μ V-degré). On donne la préférence, actuellement, aux alliages Nickel-Chrome et Nickel-Aluminium qui peuvent supporter, sans altération, des températures supérieures à 1 000°, avec des f.e.m. de l'ordre de 50 μ V par degré. Les Acieries d'Imphy livrent de tels couples, dont le fil positif (BTE) et le fil négatif (ATE) ont leurs f.e.m. reportées sur la figure 31. Lorsqu'on ne dépasse pas 700° et que l'on veut disposer d'une f.e.m. élevée, on associera le fil BTE avec un constantan (CTE); un tel couple a une résistance pratiquement constante à toutes les températures.

En raison de leur prix peu élevé, ces couples peuvent être faits de fils de grand diamètre, présentant l'avantage de posséder une faible résistance. On s'af-

Sur le sujet de CHEVENARD, *Chaleur et Industrie*, juillet 1923

Mémoire des températures.

7

ULTIMHEAT
VIRTUAL MUSEUM

franchit ainsi des erreurs provenant des variations de la profondeur d'immersion dans l'enceinte à étudier. Il reste entendu, toutefois, que ces couples ne présentent pas une fidélité ni une homogénéité tout à fait comparables à celles du couple Le Chatelier, surtout s'ils sont utilisés à des températures dépassant $1\ 000^{\circ}\text{C}$.

La Maison Heraeus a mis au point, assez récemment, un nouveau couple (couple 32/40), fait d'alliage Pt-Au, fournissant 49 mV à $1\ 000^{\circ}$ et $59,6\text{ mV}$ à $1\ 200^{\circ}$, avec une fidélité très satisfaisante.

Pour atteindre des températures de l'ordre de $2\ 000^{\circ}\text{C}$, on a utilisé un couple iridium-iridium avec 10% de ruthénium. Un tel couple ne donne pas toute satisfaction, en raison des importants défauts d'homogénéité des fils.

Un couple tungstène associé à un alliage à 75% de Tu et 25% de Mo¹ permet d'atteindre $3\ 000^{\circ}\text{C}$ avec, à cette température, une sensibilité de $6\ \mu\text{V}$ par degré et une f.e.m. de 6 mV environ. Toutefois ce couple, très oxydable, doit être utilisé dans un excellent vide ou dans une atmosphère inerte d'argon. Il présente en outre un maximum de f.e.m. (1 mV) vers 600° et un point d'inversion vers $1\ 200^{\circ}\text{C}$, ce qui limite un peu son emploi.

Enfin, pour des mesures industrielles, on a proposé l'emploi d'un couple formé d'un tube extérieur en graphite, à l'extrémité fermée duquel on fixe une tige centrale de tungstène; l'intérieur du tube est constamment rempli d'un gaz inerte sous pression. On a proposé également le couple graphite-carborundum.

Il reste entendu que de tels couples peuvent, à la rigueur, servir pour des repérages industriels assez grossiers, mais ne s'adaptent pas à des mesures de précision.

1. WANGENHEIM, Zts f. techn. Phys., 6, p. 358 (1925).



Pour les basses températures, on peut employer le couple Cu-Constantan permettant d'atteindre -220°C avec, à cette température, une sensibilité d'environ $15\ \mu\text{V}$ par degré. Pour tout ce qui concerne les très basses températures, du domaine de l'hydrogène et de l'hélium liquides, nous renverrons aux articles originaux de Keesom et de ses élèves¹.

61. Montage des couples. Tubes de protection. —

Dans le cas du couple Pt-Pt Rh, le montage s'effectue en entourant un des fils du couple (ou les deux fils), d'un petit tube de porcelaine de diamètre intérieur 1 mm et diamètre extérieur 2 mm environ ; le tout est plongé dans un tube protecteur de diamètre intérieur 4 à 6 mm. Dans les couples industriels on dispose, autour de chacun des fils, des perles isolantes en porcelaine assurant l'isolement entre les fils et l'enveloppe extérieure.

Du moins pour les couples faits d'alliages peu coûteux, on peut adopter une disposition assez courante qui consiste à souder une tige, par exemple d'alliage nickel-aluminium, à l'extrémité fermée d'un tube nickel-chrome servant de deuxième fil du couple et en même temps d'enveloppe protectrice ; cette disposition a l'avantage d'assurer une parfaite liaison thermique entre le couple et l'enceinte.

En ce qui concerne les tubes de protection des couples, un assez grand nombre de conditions, souvent contradictoires, doivent se trouver remplies, en particulier les suivantes. Le tube doit supporter les températures d'utilisation sans se déformer ; il doit être peu sensible aux brusques variations de température : il ne doit pas émettre de produits volatils susceptibles de souiller les fils du couple. Il ne doit pas être poreux,

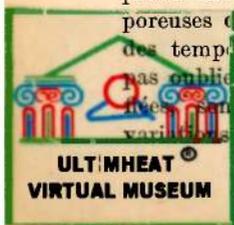
¹ Proc. Amsterdam 35, p. 10 à 33 (1932).



ni attaqué par les bains et vapeurs dans lesquels il se trouve plongé. Il doit, en outre, avoir une conductibilité calorifique suffisante pour assurer une bonne et rapide liaison thermique entre le couple et l'enceinte. Toutefois, dans le cas de tubes de grande conductibilité calorifique, la longueur de ces tubes et leur profondeur d'immersion dans l'enceinte doivent être suffisantes pour que la conductibilité thermique vers l'extérieur ne risque pas d'amener d'erreurs de mesure (138).

On peut utiliser, comme tubes protecteurs de couples, des tubes en silice fondue ; ils ont l'avantage de supporter de très brusques variations de température. Ils ont, toutefois, l'inconvénient de se dévitrifier facilement s'ils sont chauffés et refroidis assez souvent à des températures dépassant 1 000° ; ils sont peu perméables aux gaz. Dans le cas des couples platine, l'atmosphère intérieure doit être nettement oxydante, si l'on veut éviter l'altération du couple.

Pour les températures plus élevées, on donnera la préférence aux porcelaines réfractaires, faites de proportions variables d'alumine et de silice, allant jusqu'à l'alumine presque pure. Certaines de ces masses sont poreuses et, de ce fait, assez peu sensibles aux variations brusques de température. On pourra remédier à leur porosité, du moins aux températures relativement basses, en leur adjoignant un enduit superficiel extérieur vitrifié. Dans le cas où l'on désire éviter l'attaque du couple par des gaz ou métaux volatils provenant de l'enceinte, on adoptera des masses peu poreuses dont certaines peuvent tenir le vide jusqu'à des températures de l'ordre de 1 500° C. Il ne faut pas oublier toutefois que ces masses, en partie vitrifiées, sont beaucoup plus sensibles aux brusques variations thermiques.



Les porcelaines ont toujours l'inconvénient, aux températures dépassant 1200 à 1300°, de devenir nettement conductrices de l'électricité, ce qui amène des difficultés dans la mesure des f.e.m., du moins dans des fours chauffés électriquement, des dérivations se produisant entre la résistance de chauffe et les fils du couple ¹.

Le graphite, qui peut être tourné en tubes d'épaisseur et diamètre variés, convient très bien comme tube protecteur, du moins pour les couples qui ne sont pas faits d'alliages de platine. Il possède une très grande conductibilité calorifique et fournit une atmosphère réductrice favorable à la bonne conservation des alliages nickel-chrome, nickel-aluminium. Les tubes en carborandum présentent les mêmes avantages que le graphite.

On peut également utiliser des tubes métalliques en nichrome comme tubes de protection. Enfin, on alliera les qualités des tubes de porcelaine, assez bons isolants électriques mais fragiles, à celles des tubes métalliques, peu fragiles, en utilisant un tube de protection central en porcelaine protégé extérieurement contre les chocs mécaniques par un tube métallique; l'ensemble sera assujéti sur une monture, fixée à l'extrémité ouverte des tubes de protection et munie de bornes permettant la jonction avec les fils d'aménée à l'appareil de mesure.

Nous ne donnerons pas de détails sur les diverses variantes adoptées par les constructeurs pour ces montures de cannes pyrométriques. Signalons toutefois l'intérêt qu'il peut y avoir à protéger les bornes de jonction contre les chocs ou l'humidité au moyen de capuchons métalliques étanches.

Phys., 2, p. 205 (1931).



62. Soudures froides. — Dans la pratique industrielle et parfois aussi dans des mesures courantes de laboratoire, on ne s'astreint pas à maintenir les soudures froides à 0° . Dans ce cas il importe de remarquer que, si les soudures froides sont portées à t° et la soudure chaude à t° , on a : $e'_i = e^i - e^{\theta}$. Supposons le couple branché sur un millivoltmètre comportant une graduation en degrés (avec soudures froides à 0°) et la température des soudures froides égale à 20° ; si la lecture sur l'instrument est de 1 245° par exemple, on aura la température correcte de l'enceinte en *ajoutant* à la lecture 1 245° le nombre de degrés qui, au voisinage de 1 245°, correspond à 110 μ V, c'est-à-dire 9° environ (Tableau XVII, p. 219) et non 20° comme on pourrait être tenté de le faire.

Dans beaucoup de cas, pour avoir la correction, on peut se contenter de multiplier la température t des soudures froides par un coefficient dont la valeur est donnée par le tableau suivant :

250 à 400°C	400 à 550°C	550 à 900°C	900 à 1450°C
0,60	0,55	0,50	0,45

63. Fils de compensation. — Il arrive fréquemment, en particulier dans le cas du couple Le Chatelier, que, pour des raisons d'économie, les deux soudures froides se trouvent placées à une distance relativement faible de l'enceinte et que leur température ne pourrait être ni réglée, ni mesurée avec précision. On reporte alors les soudures froides à une plus grande distance de l'enceinte dans une zone où la température pourra être constante et connue. On utilise à cet effet



des fils de compensation choisis de façon qu'ils n'introduisent pas, dans le circuit, de f.e.m. susceptible de s'ajouter à celle du couple.

Dans le cas du couple Pt-Pt Rh à 10 % les fils de compensation utilisés sont : l'un un fil de cuivre branché sur le fil Pt Rh, l'autre un fil fait d'un alliage de cuivre à 2 % de nickel qui sera branché sur le fil platine (fig. 32). Dans ces conditions, la valeur de la f.e.m. est la même que si l'on avait plongé les deux soudures S_1 S_2 à la température θ commune aux deux soudures S'_1 S'_2 . On remarquera que les soudures S_1 S_2 ont une

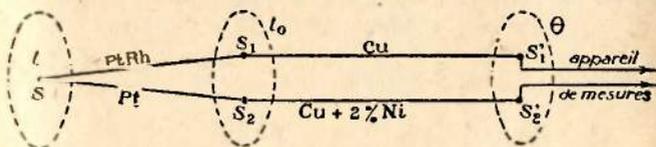


FIG. 32.

f.e.m. non nulle mais que, étant donnée la composition de l'alliage Cu Ni, les deux f.e.m. correspondantes sont en opposition et se compensent exactement. Il importe toutefois de brancher les fils de compensation dans le sens convenable, une interversion des fils ne donnerait plus la compensation mais fournirait, au contraire, une erreur deux fois plus grande.

Pour des couples autres que le couple Le Chatelier, on utilisera comme fils de compensation des fils de même substance que les fils correspondants du couple.

64. Réalisation de la soudure froide. — Dans une mesure industrielle, il convient de placer les deux soudures S'_1 S'_2 à une température θ aussi constante que possible. Dans ce but, on peut réaliser dans le sol un puits de profondeur 3 m environ ; à cette profondeur



ULTIMHEAT
VIRTUAL MUSEUM

la température restera constante à 2° près. On peut aussi, en particulier pour des installations comportant un assez grand nombre de couples, utiliser une boîte thermostat, à réglage automatique de la température, dans laquelle on mettra toutes les soudures froides des couples utilisés.

65. Correction de soudure froide. Compensation automatique. — Si le potentiomètre de la figure 28 a été étalonné en températures (la soudure froide étant supposée à 0°) et si l'on effectue des mesures avec les soudures froides à la température de 20° , on pourra effectuer automatiquement la correction de soudure froide, de façon à conserver la même graduation en températures sur l'échelle, en décalant le

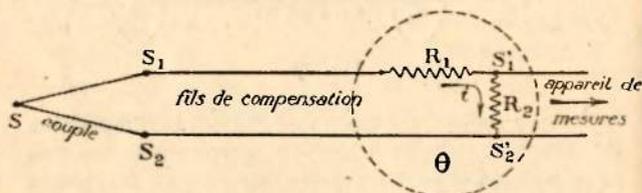


FIG. 33.

point de départ D du circuit potentiométrique opposé au couple et le fixant à la division D' correspondant à la température 20° .

On peut également effectuer une compensation *automatique* de la température de la soudure froide. Diverses solutions ont été proposées; nous n'en retiendrons qu'une qui consiste à disposer (fig. 33) une résistance R_1 , sans coefficient de température, en série sur l'un des fils du couple, et une autre résistance R_2 en dérivation entre les deux fils du couple, cette dernière résistance ayant un coefficient de température α (p.



ex. nickel : $a = 0,006$), l'ensemble de ces résistances étant maintenu à la température θ de $S'_1 S'_2$.

Soit e la f.e.m. du couple, le courant i débité par ce couple dans la résistance R_2 est donné par $i = \frac{e}{R_1 + R_2}$;

la différence de potentiel entre les points $S'_1 S'_2$ est alors fournie par : $e' = e \frac{R_2}{R_1 + R_2}$;

or $e = k(t - \theta)$ et $R_2 = r_2(1 + a\theta)$. Pour obtenir la compensation il faut que l'on ait :

$$kt \frac{r_2}{R_1 + r_2} = k(t - \theta) \frac{r_2(1 + a\theta)}{R_1 + r_2(1 + a\theta)}, \text{ quel que soit } \theta.$$

Après simplifications il vient : $\frac{r_2}{R_1} = at - 1$; pour

1 000° on devra choisir $\frac{r_2}{R_1} = 5$; on remarquera toute-

fois que la compensation n'a lieu en toute rigueur qu'au voisinage d'une température donnée, et la méthode ne convient que pour des installations de contrôle d'un four ; on peut alors, sans grand inconvénient, supprimer les fils de compensation.

Pour des mesures au millivoltmètre, la compensation ci-dessus reste encore valable. On peut toutefois, dans ce dernier cas, réaliser un système automatique au moyen d'une bilame se dilatant sous l'effet de la température et décalant automatiquement le zéro de l'échelle du millivoltmètre. Nous reviendrons plus loin sur les dispositifs enregistreurs de température auxquels nous consacrerons un chapitre spécial.

1. L'appareil de mesures est supposé parcouru par un courant négligeable ; ceci est rigoureux dans le cas des mesures au potentiomètre. Nous admettons en outre négligeable la résistance du couple et des fils de jonction, ce fait la méthode s'adapte surtout au cas de couples r. Al pour lesquels cette résistance est faible.



CHAPITRE VI

GRANDEURS RELATIVES AU RAYONNEMENT. — PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES CORPS. — LOI DE KIRCHHOFF.

66. **Grandeurs énergétiques.** — Avant d'étudier les lois du rayonnement des corps, nous rappellerons très rapidement les définitions et notations adoptées actuellement pour les diverses grandeurs physiques liées au rayonnement, du moins dans le cas des sources à rayonnement continu ¹.

1) *Flux total d'énergie Φ transporté par seconde par le rayonnement d'une source.* — L'énergie rayonnée par une source dans l'espace qui l'entourne peut être recueillie et mesurée en entourant complètement la source d'un calorimètre à parois opaques : on recueillera, par seconde, un nombre de calories donné, représentant une énergie facile à calculer. Cette énergie est l'équivalent d'une puissance en mécanique, on l'exprimera en watts. Nous l'appellerons flux total d'énergie rayonné par la source (symbole Φ) ou encore intensité énergétique de la source.

2) *Intensité énergétique d'une source dans une*



direction donnée (\mathcal{J}). — Considérons, à partir de la source A, une direction Ax, et autour de Ax un angle solide $d\omega$; si $d\Phi$ est le flux d'énergie envoyé par la source dans cet angle solide, l'intensité de la source dans la direction Ax s'exprimera par le rapport :

$$\mathcal{J} = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

Cette intensité s'exprimera en watts par stéradian.

3) *Éclairement & produit par une source sur un élément de surface.* — C'est le rapport entre le flux Φ

reçu par l'élément et la surface de cet élément. \mathcal{E} s'exprimera en watts par cm^2 .

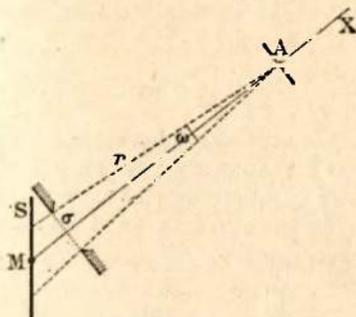


FIG. 34.

4) *Définitions spéciales aux sources de dimensions finies. Radiance énergétique (R).* —

Soit s la surface de la source émettrice et Φ le flux

total rayonné dans toutes les directions par cette source, la radiance a pour expression le rapport :

$$R = \frac{\Phi}{s}.$$

Cette quantité, tout à fait analogue à un éclairement, s'exprimera en watts par cm^2 .

5) *Brillance énergétique dans une direction donnée* (\mathcal{B}). — Étant donnée une direction MX issue de la source (fig. 34), on suppose un écran percé d'une petite

surface τ placée tout près de la source et perpendiculaire à MX ; si J est l'intensité de la source ainsi diaphragmée, on a :

$$B = \frac{J}{\sigma},$$

ce qui revient à dire que la brillance dans la direction MX est l'énergie en watts émise, dans un angle solide unité, par 1 cm² de la projection de la source sur un plan perpendiculaire à la direction MX.

Si l'on place un récepteur en un point A de la direction MX, perpendiculairement à MX, l'éclairement \mathcal{E} de ce récepteur peut s'écrire indifféremment, en appelant r la distance de A à la source :

$$\mathcal{E} = \frac{B\sigma}{r^2} \quad \text{ou} \quad \mathcal{E} = B\Omega,$$

Ω désignant l'angle solide sous lequel la source est vue du point A. Autrement dit la brillance dans une direction donnée n'est autre que l'éclairement produit par l'unité d'angle solide de la source en un point quelconque de la direction considérée.

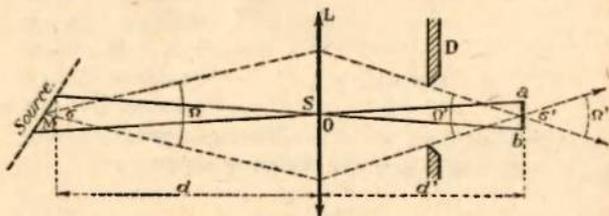


FIG. 35.



67. Pyromètre à radiation totale. — Cette notion de brillance étant fondamentale, nous allons étudier, à titre d'application, le problème optique qui se pose dans le cas du pyromètre à radiation totale (fig. 35).

Grâce à une lentille L on fait former une image de la source sur un récepteur ab , de surface σ' . La source doit avoir un diamètre suffisant pour que son image couvre totalement ab . Un diaphragme D fixé rigidement à ab limite à une valeur constante l'angle solide Ω' d'ouverture du faisceau qui tombe sur ab .

Le flux Φ envoyé par la source peut s'écrire :

$$\Phi = B \sigma \Omega = B \sigma \frac{S}{d^2},$$

(S, surface de la lentille qui participe à la formation de l'image). Or on a :

$$\frac{\sigma}{d^2} = \frac{\sigma'}{d'^2}$$

d'où :

$$\Phi = BS \frac{\sigma}{d^2} = B \sigma' \Omega'.$$

Autrement dit, avec les réserves faites plus haut (image de la source couvrant totalement le récepteur, angle solide Ω' maintenu constant), le flux reçu par le récepteur est égal à la brillance de la source multipliée par une constante de l'appareil, et cela quelle que soit la distance de visée de la source ; en d'autres termes, le pyromètre à radiation fournit une mesure de la brillance dans la direction d'observation.

De même la brillance lumineuse que nous précisons plus loin (69) définit l'éclairement de l'image rétinienne ; l'expression $E = B\Omega'$ s'applique encore ici, Ω' désignant l'angle sous lequel la pupille de l'œil est vue d'un point de la rétine. Si l'œil observe deux plages lumineuses contiguës, le rapport des éclaircissements des images rétiniennes sera égal au rapport des brillances des deux sources. Précisons toutefois que, pour qu'il en soit ainsi, la pupille doit être entièrement couverte par les deux faisceaux.



68. **Loi de Lambert.** — Certaines sources (ce sera le cas en toute rigueur pour le corps noir) ont une brillance indépendante de la direction d'émission (loi de Lambert). Pour une telle source, un pyromètre à radiation totale donnera des indications indépendantes de la direction de visée.

Une source plane, de dimensions limitées, obéissant à la loi de Lambert, émet, dans une direction donnée, une intensité énergétique proportionnelle au cosinus de l'angle que fait la direction d'émission avec la normale à la surface émettrice, d'où le nom de « loi du cosinus » donné souvent à la loi de Lambert.

Relation entre la radiance et la brillance d'une source obéissant à la loi de Lambert. — Considérons une source dont la brillance B est la même dans toutes les directions. Proposons-nous de calculer sa radiance R . Considérons un élément de surface 1 cm^2 ; la surface apparente de cet élément, dans la direction OX faisant

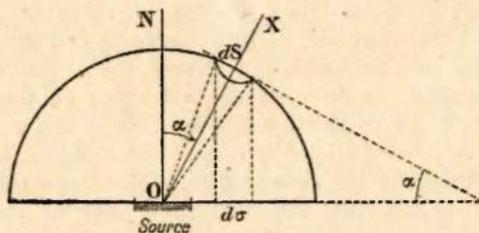


FIG. 36.

avec la normale ON un angle α (fig. 36), est égale à $\cos \alpha$; l'énergie émise dans le cône limité par l'élément de surface dS , pris sur la sphère de rayon 1, a pour expression $BdS \cos \alpha$; or, $dS \cos \alpha$ n'est autre que la projection $d\sigma$ de dS sur le plan de la source;



la radiance R sera donc égale à B multipliée par la somme de tous les éléments tels que $d\tau$, c'est-à-dire multipliée par π . $R = \pi B$.

69. **Mesures visuelles. Grandeurs photométriques.** — Les mesures énergétiques supposent des moyens d'investigation assez compliqués et sont sujettes à de nombreuses causes d'erreur ; aussi, chaque fois qu'on le peut, ramène-t-on les problèmes de pyrométrie optique à des mesures visuelles. Ajoutons d'ailleurs que l'œil est incapable d'évaluer des rapports de flux lumineux, même si ces flux sont de même couleur ; et que toute mesure pyrométrique visuelle précise devra se ramener à l'évaluation de l'égalité de deux flux monochromatiques de même couleur.

Dans tout ce qui suit nous nous limiterons aux grandeurs photométriques strictement indispensables pour l'étude de la pyrométrie optique.

1) *Intensité lumineuse d'une source.* — Unité : bougie internationale. L'unité fondamentale est l'unité d'intensité lumineuse. Cette unité est concrétisée par des lampes électriques étalons à filament de carbone, fonctionnant sous un régime bien défini, et dont la valeur en bougies internationales est bien connue ¹.

2) *Flux lumineux (F).* — L'unité de flux lumineux est le flux produit par une source de 1 bougie dans un angle solide égal à l'unité ; elle porte le nom de lumen.

3) *Éclaircissement (E) d'une surface.* — C'est la valeur du flux lumineux reçu par unité de surface :

$$E = \frac{F}{S}$$

En particulier, pour une surface éclairée normale-



La Commission internationale de l'Éclairage, réunie à Berlin, en 1933, vient d'adopter comme étalon primaire le corps noir à la température du platine.

ment par une source d'intensité I , placée à la distance r , l'éclairement a pour expression :

$$E = \frac{I}{r^2}$$

Unités : lux : 1 lumen par m^2 , ou 1 bougie à 1 mètre,
phot : 1 lumen par cm^2 , ou 1 bougie à 1 cm.

4) *Radiance (R) d'une surface lumineuse.* — C'est le flux lumineux total émis par l'unité de surface de la source :

$$R = \frac{F}{S}$$

Elle s'exprimera en lumens par cm^2 .

5) *Brillance (B) d'une surface dans une direction donnée.* — Même définition que plus haut ; la brillance s'exprime en bougies par cm^2 . Cette définition est évidemment valable aussi bien pour une surface qui rayonne directement (corps incandescent) que pour une surface n'émettant pas par elle-même (surface réfléchissante éclairée par une source) et aussi pour l'image d'une source fournie par un système optique.

La notion de brillance joue un rôle fondamental dans l'observation visuelle, c'est elle qui caractérise l'éclairement de l'image rétinienne (67) ; elle sera à la base de toutes les mesures de pyrométrie optique.

70. — *Courbes de répartition spectrale de l'énergie ou de la lumière émises par une source.* — Les mesures de la pyrométrie optique n'ont de sens que lorsqu'elles s'appliquent aux sources lumineuses fournissant un spectre continu (corps solides incandescents, flammes avec particules solides, soleil, corps noir).

Pour étudier la répartition spectrale d'un tel rayonnement, considérons d'abord la radiance R . Pour l'ensemble des radiations comprises entre deux lon-



guez d'onde voisines λ et $\lambda + d\lambda$, la radiance dR émise par la source dans ce petit intervalle spectral est proportionnelle à $d\lambda$ et peut s'écrire :

$$dR = r_\lambda d\lambda.$$

La courbe spectrale de radiance énergétique s'obtiendra en portant en abscisses les valeurs de λ et en ordonnées les valeurs du coefficient r_λ . L'aire comprise entre cette courbe et l'axe des abscisses représente la radiance énergétique totale de la source, et l'on peut écrire :

$$R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda.$$

On peut de même considérer la brillance énergétique totale B dans une direction donnée et écrire :

$$dB = b_\lambda d\lambda.$$

On portera ici en abscisses les valeurs de λ et en ordonnées les valeurs de b_λ , et l'on a, comme plus haut :

$$B = \int_0^\infty b_\lambda d\lambda.$$

Les coefficients r_λ et b_λ dépendent évidemment de l'unité choisie pour représenter les longueurs d'onde.

Nous les désignerons par les noms de radiance *spectrale* énergétique et de brillance *spectrale* énergétique ; dans la suite les longueurs d'onde seront toujours exprimées en microns.

D'après ce qui précède, l'énergie envoyée, en 1 seconde, par un élément de surface apparente $d\sigma$, dans un angle solide $d\omega$, entre les longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$ a pour expression :

$$dW = b_\lambda \cdot d\lambda \cdot d\omega \cdot d\sigma.$$

On pourra enfin donner les mêmes définitions que ci-dessus dans le cas des grandeurs photométriques. Le coefficient b_λ portera alors le nom de lumi-



de des températures.

Entre les grandeurs correspondantes, énergétique et lumineuse, on a la relation :

$$\frac{b_{\lambda} \text{ (énergétique)}}{b_{\lambda} \text{ (lumineuse)}} = K_{\lambda}$$

K_{λ} désignant le facteur de visibilité de l'œil pour la radiation λ . On sait que ce facteur est maximum pour $0,555\mu$ et s'annule pour les extrémités du spectre visible.

71. Propriétés optiques des corps. — Quand une radiation monochromatique tombe sur un corps, une partie de l'intensité incidente se trouve réfléchie par la substance, une autre est transmise à travers la substance, enfin, une troisième fraction est absorbée à l'intérieur de la substance. A chacune de ces trois énergies correspond un facteur dont la définition est donnée ci-dessous :

Facteur de transmission	τ_{λ}	=	$\frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie incidente}}$
Facteur de réflexion	ρ_{λ}	=	$\frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}}$
Facteur d'absorption	α_{λ}	=	$\frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$

On a évidemment, entre ces trois facteurs, la relation :

$$\tau_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1.$$

Pour un corps opaque dont le facteur de transmission est nul, la relation se réduit à : $\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$.

Le facteur de transmission d'une substance varie avec la longueur d'onde. Nous donnons (fig. 37) la courbe des facteurs de transmission de diverses substances transparentes dans le spectre visible et dans l'infrarouge (épaisseur 1 cm). On voit que le verre, le quartz, assez transparents jusqu'à 3μ , deviennent pratiquement opaques au-delà de 4μ . Dans tous les



appareils où l'on désirera faire intervenir une notable proportion d'infra-rouge, il sera nécessaire d'utiliser des glaces de fermeture ou des pièces optiques en fluorine, ou mieux en sel gemme.

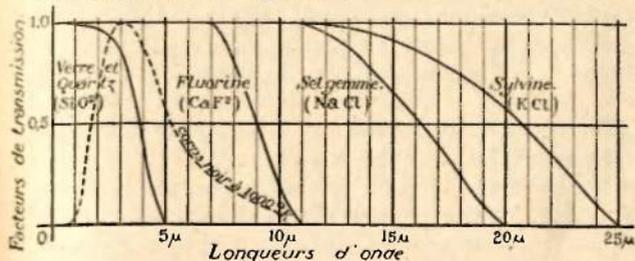


FIG. 37. — Transmission de diverses substances.

Nous rappelons également la formule qui, pour une radiation monochromatique, lie l'intensité I_0 à l'entrée dans un milieu absorbant d'épaisseur x et l'intensité transmise I :

$$(10) \quad \tau_\lambda = \frac{I}{I_0} = e^{-kx},$$

k désignant le coefficient d'absorption de la substance pour la radiation *monochromatique* considérée.

On peut définir pour un rayonnement complexe des facteurs α et τ , tout à fait analogues à ceux donnés plus haut. Si b_λ est la brillance spectrale énergétique d'un tel rayonnement on a, par définition :

$$\tau \text{ énergétique} = \frac{\int_0^\infty b_\lambda \tau_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty b_\lambda d\lambda} ; \quad \tau \text{ lumineuse} = \frac{\int_0^\infty b_\lambda \tau_\lambda K_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty b_\lambda b K_\lambda d\lambda} ;$$

Il y a évidemment des relations analogues pour α et ρ . Il importe toutefois de remarquer que, pour un milieu

